Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Тверской государственный технический университет

На правах рукописи

Лобачева Людмила Владимировна

# Системный анализ и управление водными эмиссионными потоками объекта захоронения твердых коммунальных отходов

Научная специальность –2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)»

Диссертация
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Матвеев Юрий Николаевич

Тверь – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..... 5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ…… 11
1.1 Понятие, генезис и классификация объектов захоронения твердых коммунальных отходов…… 11
1.2 Анализ воздействия объектов захоронения отходов на элементы экологических систем…… 21
1.3 Анализ подходов к мониторингу объектов захоронения отходов….. 24
1.4 Обзор системных представлений о формализации объектов захоронения отходов…….. 31
1.4.1 Математическое моделирование миграции загрязнений в почвогрунтах природно-технических систем утилизации отходов…….…. 35
1.4.2 Процессы миграции загрязнений в почвогрунтах…….… 36
1.5 Анализ подходов к управлению природно-техническими системами захоронения отходов…… 41
1.6 Постановка задачи исследования…….…….. 43
1.7 Выводы по первой главе…….. 48
ГЛАВА 2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ…… 49
2.1 Анализ исходных материалов объекта размещения твердых коммунальных отходов…….. 50
2.2 Методика обследования объекта…… 56
2.2.1 Определение активной пористости, параметра гидродисперсии параметров сорбции……... 59
2.2.2 Определение средней скорости фильтрации…….…. 68
2.2.3 Коэффициенты трансформации и молекулярной диффузии…… 68
2.2.4. Исходное загрязнение и концентрации загрязняющих веществ в источнике загрязнения…… 70
2.3 Выводы по второй главе…….. 71
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОБЪЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ……. 73
3.1. Математические модели миграции загрязнений объекта захоронения отходов…….. 75
3.2 Постановка краевых задач…… 77
3.3 Аналитическое решение задачи миграции загрязнений объекта захоронения отходов…… 80
3.4 Математическое описание распространения загрязняющих веществ в водоемах…… 81
3.5 Экспериментальные исследования по прогнозу распространения загрязнений в грунтовые и поверхностные воды от объекта захоронения отходов…… 85
3.5.1 Расчет распространения загрязняющих веществ в подземных водах…… 85
3.5.2 Расчет распространения загрязняющих веществ в поверхностных водах……. 93
3.6 Выводы по третьей главе……. 95
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ…… 97
4.1 Модель интеллектуального мониторинга объекта утилизации отходов…… 97
4.2 Оценка экологического риска объекта утилизации отходов…… 101
4.3 Управление водными эмиссионными потоками объекта утилизации отходов…… 110
4.3.1. Прогнозирование совместного распространения в поверхностных водах загрязняющих веществ, выклинивающихся с фильтрационным потоком и сбрасываемых с поселковых очистных сооружений…… 117
4.4. Выводы по четвертой главе…… 119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 121

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ…….. 123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ…….. 124
ПРИЛОЖЕНИЕ А…… 142
ПРИЛОЖЕНИЕ Б…… 143
ПРИЛОЖЕНИЕ В……... 144

# ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.**

Одним из серьезнейших вызовов современности, связанных с обеспечением экологической устойчивости территории, является проблема образования и использования твердых коммунальных отходов. За счет разнообразных антропогенных и техногенных процессов в почвенных слоях городских агломераций происходит аккумуляция различных органические и неорганические веществ, биологически активных компонентов. Основными источниками органических загрязнений являются твердые коммунальные отходы. В настоящее время наиболее распространенным способом утилизации отходов является их захоронение на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО). Стремительная глобализация, рост урбанизации городов и численности населения, привело к увеличению количества образующихся коммунальных отходов, которые складируются на свалках и полигонах ТКО по всему миру. Так, по данным Всемирного банка объем ежегодно образующихся муниципальных отходов составляет примерно 2,1 млрд. тонн, из которых 30 – 40% не перерабатывается, а размещается на свалках [1, 2].

Поэтому снижение негативного влияния полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) на окружающую природную среду является одной из актуальных и нерешенных проблем современных урбанизированных территорий.

Актуальным аспектом оценки негативного влияния объектов утилизации ТКО на компоненты окружающей среды является изучение миграции загрязняющих веществ и факторов, способствующих вторичному загрязнению природной среды. Изучение возможных путей миграции отдельных опасных компонентов свалок позволит выбрать оптимальные решения по управлению объектами утилизации отходов.

**Степень разработанности темы.** Фундаментальные теоретические положения и практические рекомендации по эксплуатации полигонов

захоронения ТКО изложены в научных трудах отечественных и зарубежных исследователей В.В. Разнощика, Я.И. Вайсмана, Л.П. Грибановой, Н.Н. Слюсарь, Т.Г. Середа, Е.В. Щербиной, R Stegmann, P. Kjeldsen, M. Barlaz, D. Laner и др. Результаты разработки подходов к мониторингу экологических систем представлены в работах Ю. А. Израэль, И. П. Герасимова, В. М. Калинина, Н. Е. Рязановой, П. М. Федорова, В. А. Снытко, Р.Н. Макарова, И.С. Константинова и др. Методам моделирования, являющимся современным инструментарием системного анализа, посвящены работы Р. Шеннона, В.В. Емельянова, Ю.Н. Павловского, М.В. Аржакова, Ю.Н. Матвеева и др. Методам математического моделирования экологических систем и антропогенного воздействия на окружающую среду посвящены работы В.В. Кафарова, С. П. Кундаса, С.Н. Костарева, Н.Н. Слюсарь, Е.В. Шеин, П. Бертокса, N. Beyli, D. Rad. Результаты математического моделирования миграции загрязнений в объектах гидросферы изложены в работах отечественных и зарубежных исследователей С.Ф. Аверьянова, В.М. Шестакова, Д.Ф. Шульгина, В.Е. Клыкова, Ф.М. Бочевер, Я. Бэр, Э.Н. Бондарева, В.Н. Николаевского, В.Н. Лаврика, В.И. Пеньковского, Ф.Д. Микайылова, Л.И. Сербиной, C. Zhao, A. Prosperetti, Y. S.Wu, I. Battiato, D. M.Tartakovsky, D. Roubinet, S. Molins и др. В области теории управления и идентификации технических объектов посвящены работы М.В. Аржакова, Н.С. Райбмана, Я.З. Цыпкина, В.В. Кафарова, Б.В. Палюха, Н.А. Семенова, P. Eickhoff, L. Lyung. Разработкой подходов к управлению сложных природно-технических систем депонирования отходов на основе методов системного анализа занимаются многие исследователи, в частности Н.И. Артемов, Т.Г. Середа, Н.С. Костырев и др.

**Цель и задачи работы.**

Целью работы является разработка основ анализа и синтеза управления водными эмиссионными потоками объекта захоронения твердых коммунальных отходов с использованием системного подхода.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1) осуществить системный анализ результатов лабораторных, натурных и имитационных экспериментов для исследования эмиссионных потоков полигона ТКО;

2) разработать и обосновать алгоритм прогнозирования распространения загрязнений от объекта утилизации отходов в подземных и поверхностных водах;

3) определить параметры миграции загрязнений в грунтовых водах;

4) разработать методику оценки экологического риска объекта депонирования отходов;

5) разработать принципиальную схему системы управления водными эмиссионными процессами утилизации отходов.

**Объект исследования.**

Объекты исследования – процессы распространения водных эмиссионных потоков объекта захоронения твердых коммунальных отходов (ТКО), рассматриваемые как объекты моделирования и управления.

**Предметом исследования** является методы, модели и алгоритмы управления потоками загрязнений, протекающих на объектах захоронения ТКО.

**Научная новизна.**

Научная новизна представлена следующими результатами исследования:

1. Обоснована методика анализа процессов миграции загрязнений технической системы захоронения отходов в подземных водах.

2. Разработан вычислительный алгоритм решения задачи переноса загрязнений в подземном потоке от объекта утилизации отходов с использованием консервативной разностной схемы, позволяющей наиболее точно учитывать геометрию моделируемых объектов.

3. Установлены факторы, оказывающие существенное влияние на скорость продвижения фронта загрязнений, отражающие процессы

трансформации вещества и учитываемые в модификации математической модели миграции веществ в подземных водах эмпирическими коэффициентами $k_1$ и $k_2$.

4. Модифицирована методика оценки экологического риска объекта утилизации отходов.

5. Разработана принципиальная схема системы управления водными эмиссионными потоками полигона ТКО, расположенного в водоохранной зоне поверхностного объекта гидросферы.

**Достоверность научных положений** подтверждается корректной постановкой задач исследований, обоснованным использованием теории и практики физической химии, математической физики, математической статистики и современных достижений теории и практики вычислительной техники, достаточным объемом лабораторных и вычислительных экспериментов, результаты которых свидетельствуют об адекватности разработанных моделей и обоснованности выводов и рекомендаций.

**Практическая значимость.**

Разработанная методика позволяет проводить оценку распространения загрязнений от полигонов ТКО для прогноза развития экологической обстановки на исследуемой территории, а также может служить основанием для принятия решений о порядке использования объектов подземной гидросферы.

**Методы исследования.**

При обосновании методики прогнозирования и управления объектом утилизации отходов использовались натурные и лабораторные исследования, методы анализа и обобщения информации, методы системного анализа, общая теория систем, математическое и имитационное моделирование, современные методы вычислительной гидродинамики.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Обоснованная методика анализа процессов миграции загрязнений технической системы захоронения отходов в подземных водах.

2. Разработанный вычислительный алгоритм решения задачи переноса загрязнений в подземном потоке от объекта утилизации отходов с использованием консервативной разностной схемы, позволяющей наиболее точно учитывать геометрию моделируемых объектов.

3. Установленные факторы, оказывающие существенное влияние на скорость продвижения фронта загрязнений отражающие процессы трансформации вещества, учитываемые в модификации модели миграции веществ в подземных водах эмпирическими коэффициентами $k_1$ и $k_2$.

4. Модифицированная методика оценки экологического риска объекта утилизации отходов.

5. Принципиальная схема системы управления водными эмиссионными потоками, обеспечивающая снижение нагрузки на объекты гидросферы.

**Апробация работы.**

Научные положения и практические результаты диссертационной работы в целом и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных научно-практических конференциях: международной научно-практической конференции «Экология и безопасность жизнедеятельности» (Пенза, 2020, 2021, 2022), XXXIV международной научно-практической конференции «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований» (Новосибирск, 2020), 11-й международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2020), IV Всероссийской научно-практической конференции «Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки» (Тверь, 2020). XXIV международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» (Пенза, 2020), Всероссийской научно-практической конференции «Глобальные и региональные аспекты устойчивого развития: современные реалии» (Грозный, 2020), научно-

практической конференции «Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества» (Москва, 2021).

**Публикация результатов.**

По результатам выполненных исследований опубликованы 13 печатных работ, в том числе 4 научные статьи, опубликованных в изданиях перечня ВАК и 1 статья в журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus.

**Личный вклад соискателя.** При активном участии автора были сформулированы цели и задачи исследований, а также разработана программа опытно-экспериментальных работ. Автором проведен ряд лабораторных модельных экспериментов, систематизированы и интерпретированы экспериментальные данные, сделаны выводы по результатам работы.

**Объем и структура диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 159 источников. Основное содержание работы изложено на 147 страницах, включая 35 рисунков и 17 таблиц.

**Соответствие паспорту научной специальности.**

По теме и содержанию материалов исследования диссертационная работа соответствует научной специальности специальность – 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)» в части п. 4 области исследований «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта» и п.7 «Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов».

# ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1. Анализ природно-технических систем захоронения отходов

Полигоны ТКО являются сложными и динамичными природно-техническими системами, при исследовании которых применим системный анализ, позволяющий комплексно исследовать последствия производственно-хозяйственной деятельности человека и получить информацию для принятия решений по рациональному управлению с учетом требований охраны окружающей среды. Согласно А.В. Ван [1], ведущим методом получения необходимых данных по целевому исследованию природно-технических систем является экосистемный анализ, основу которого составляет изучение взаимосвязей между процессами, компонентами природно-технических объектов.

При этом следует учитывать, что любой полигон ТКО включает в себя массив элементов, в котором выделяют:

– экологические (природные) элементы. В этом случае системный анализ заключается в изучении геологических, гидрогеологических условий, состава, свойств окружающей природной среды в районе размещения объекта и ее взаимодействия с биотой;

– технические элементы, анализ которых включает контроль текущего состояния объекта, мониторинг изменений компонентов окружающей среды, происходящих под влиянием процессов, связанных функционированием полигона ТКО.

Множества элементов объединены технологическими, техническими и информационными связями, предназначенными для принятия оптимальных решений по управлению объектами утилизации отходов для исключения негативных последствий и снижения экологического риска для окружающей природной среды (рисунок 1.1).

Проблема принятия решения по управлению сложными природно-техническими системами сводится к поиску неких альтернативных вариантов в условиях разного рода неопределенностей. В отношении к таких сложных технических систем как полигон ТКО неопределенность обусловлена неясностью динамики развития системы, амбивалентностью трансцендентальной информации о системе, гетерогенностью формирования массива отходов, влиянием случайных факторов в ходе динамического развития системы и другими условиями. В процессе исследования многокомпонентных природно-технических систем совокупность решения включает три этапа: построение модели исследуемого объекта, постановка задачи исследования и решение поставленной математической задачи [2].

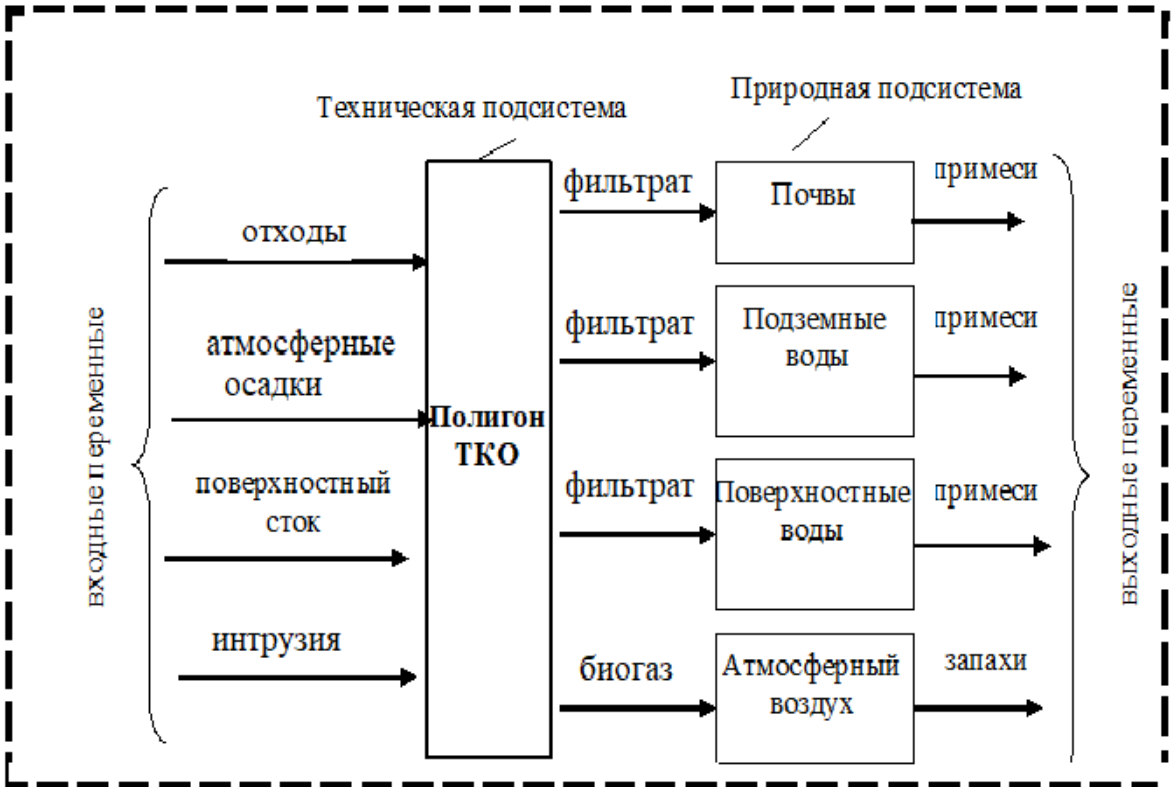



Рисунок 1.1 – Полигон ТКО как природно-техническая система

Для оценки природно-технических систем обоснуем актуальность проблемы захоронения отходов.

В настоящее время в РФ, как и в других индустриально развитых странах проблема утилизации отходов и связанная с ней проблема экологического риска стоит очень остро [3, 4].

Согласно ЕС 91/156/ЕЕК к отходам относится любое вещество или предмет, от которого его владелец избавляется или от которого ему нужно избавиться в соответствии с правовыми актами, действующими в государстве [5].

Различают отходы производства и потребления. К отходам производства относят остатки сырья, материалов, веществ, изделий, предметов, образовавшихся в процессе производства продукции, выполнении работ (услуг) и утратившие полностью или частично исходные потребительские свойства [6].

Отходы потребления включают остатки веществ, материалов, изделий, товаров (продукции или изделий), частично или полностью утративших свои первоначальные потребительские свойства для использования по прямому или косвенному назначению в результате физического или морального износа в процессе общественного или личного потребления (жизнедеятельности) использования или эксплуатации (пищевые отходы, макулатура, стеклобой, тряпье, сломанная бытовая техника и др.).

Считается, что наибольшие сложности появляются при депонировании ТКО, под которыми понимают отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд. К этой же категории относятся отходы, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и подобные по составу отходам, образующимся в процессе потребления физическими лицами [7].

Выделяют следующие категории твердых коммунальных отходов (ТКО):

– твердые бытовые отходы (ТБО) или смешенные твердые жилищные отходы;

– крупногабаритные отходы, вес и размер которых превышают параметры, разрешенные для складирования в типовые мусорные контейнеры;

– строительные отходы;

– отходы предприятий торговли;

– отходы уборки территорий;

– отходы предприятий, подобные бытовым;

– отходы транспортной сферы [8].

В последние десятилетия наряду с ростом объемов ТКО происходит уменьшение их плотности, что вероятно связано с изменением компонентного состава отходов. Так, в составе бытовых отходов увеличилась доля пластика, стекла, полимерных материалов, но практически не встречаются кости и оберточная бумага. Однако повсеместно основную долю в составе ТКО занимают различные органические материалы, чаще всего это бумага и остатки пищевых продуктов (рисунок 1.2). Кроме того, появляются новые полимерные материалы, используемые для упаковки товаров населением.

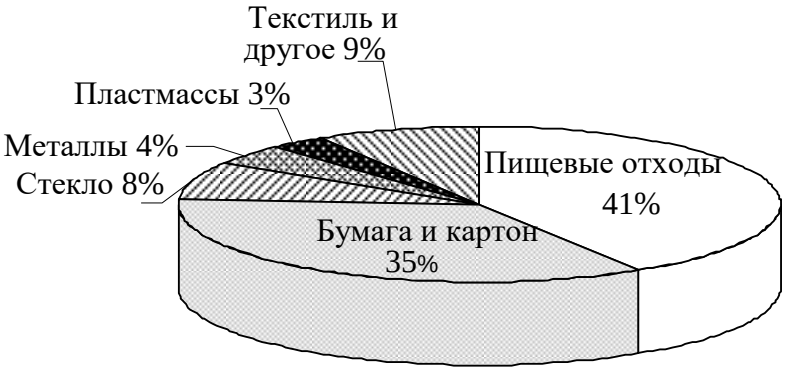



Рисунок 1.2 – Состав бытовых отходов в РФ [9]

Большое влияние на морфологический состав отходов оказывают временные (период, сезон), территориальные (климат, транспортная доступность), социально-экономические (источник отходов, структура населения, степень благоустройства жилья, наличие туристических центров, защитных зон, развития рынка сбыта вторсырья), санитарно-технические (система сбора ТКО, типы и размер контейнера, периодичность вывоза, степень развития санитарной очистки населенного пункта) факторы [9].

Современные технологии утилизации отходов можно разделить на следующие группы (рисунок 1.3):

Рисунок 1.3 – Методы утилизации коммунальных отходов

– термические способы переработки отходов – применяется для утилизации твердых отходов различных типов, предварительно отсортированных и измельченных. Такая технология позволяет освободить

значительную площадь земель за счет сокращения объема отходов. Недостатки технологии сжигания связаны с возможностью образования и эмиссии токсичных химических веществ, а также отсутствие безопасных способов утилизации золы и шлака, образующихся при сжигании;

– компостирование – используется для утилизации органических отходов посредством их биоразложения. Такой способ переработки отходов предполагает образование органических удобрений. Недостатки технологии связаны с ограничением ее применения только для органических отходов и сложностью применения в климатических условиях РФ при фактическом отсутствии сортировки при сборе бытовых отходов;

– захоронение (депонирование) отходов на полигонах и свалках ТКО. В настоящее время, несмотря на широкое применение технологий раздельного сбора мусора, вторичного использования и переработки материалов, содержащихся в ТКО, захоронение по-прежнему, остается ведущим способом утилизации отходов для многих стран мира.

В РФ из общего объема образованных отходов только около 4–5% отправляется на вторичную переработку или сжигание, а большинство отходов в России направляется на полигоны, санкционированные и несанкционированные свалки (рисунок 1.4).

Ежегодно площадь свалок в РФ увеличивается на 0,4 млн га. На каждого жителя России в среднем приходится около 450 кг мусора в год [11]. Ежегодное увеличение отходов на душу населения составляет около 5%, что в три раза превышает прирост населения страны [12].

В последние десятилетия мировое сообщество стремится следовать принципам устойчивого развития в отношении управления отходами и эксплуатации объектов их утилизации. Так, принята концепция полигона (анг. *Sustainable landfill*), представляющего собой объект, который после завершения эксплуатации сохраняет стабильную механическую структуру и его эмиссии безопасны для окружающей среды [13, 14].

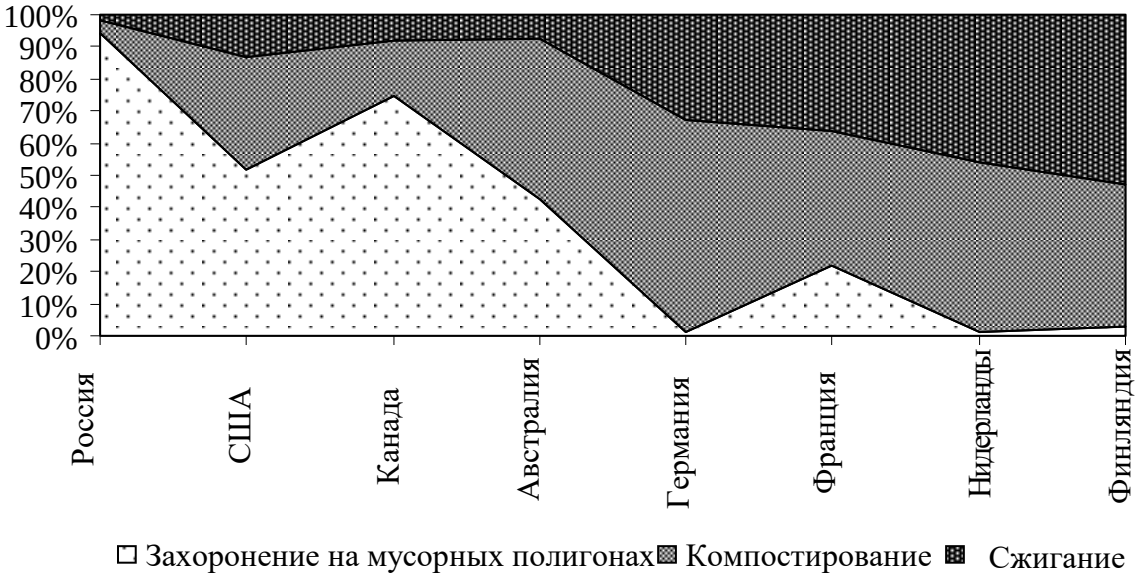



Рисунок 1.4 – Обращение с отходами в разных странах [10]

Согласно Директиве Европейского Союза 1999/31 [14] полигоны захоронения отходов подразделяются на три типа:

– полигоны размещения опасных отходов;

– полигоны размещения безопасных отходов (коммунальные и муниципальные отходы);

– полигоны размещения инертных отходов.

Дополнительно выделяют такой вид захоронения отходов, как их размещение в подземных выработках [15].

В основной части положений Директивы ЕС [14] изложены строгие технические требования к технологии эксплуатации полигонов захоронения отходов, критерии их качества с целью предотвращения воздействия на окружающую природную среду.

В историческом аспекте в РФ, как и в других стран мира, выделяют три основных стадии развития объектов депонирования отходов: стихийные (несанкционированные) свалки, официальные (санкционированные свалки, полигоны ТКО) (таблица 1.1) [16].

Согласно ФЗ «Об отходах производства и потребления» [17] и СП 320.1325800.2017 [7] полигоны ТКО представляют собой специально

оборудованные сооружения, предназначенные для размещения и обезвреживания отходов. При этом на таких объектах должна обеспечивается статическая устойчивость отходов с учетом динамики уплотнения, минерализации, газовыделения, максимальной нагрузки на единицу площади, возможности последующего рационального использования участка после закрытия полигонов и их рекультивации [7].

Таблица 1.1 – Стадии развития системы захоронения ТКО в РФ [16]

| Объект | Несанкционированная свалка | Санкционированная свалка | Полигон ТКО | Полигон ТКО для захоронения обработанных отходов |
|---|---|---|---|---|
| Выбор площадки | Нет | Чаще нет | Да | Да |
| Гидроизоляция основания | Нет | Нет/природные условия | Да | Да |
| Система очистки фильтрата | Нет | Нет | Чаще нет | Да |
| Система утилизации биогаза | Нет | Нет | Только сбор | Не требуется |
| Доля захоронения отходов | 100% | 100% | 90-95% | 25-35% |

Среди всех объектов утилизации отходов в РФ наибольшее число составляют санкционированные свалки, которые являются территориями (существующими площадками) разрешенными органами исполнительной власти для размещения промышленных и бытовых отходов, но не обустроенные в соответствии с нормативными требованиями. Они являются временными, подлежат обустройству в соответствии с требованиями

законодательства или закрытию в сроки, необходимые для проектирования и строительства полигонов, отвечающих требованиям стандартов.

В «Инструктивно-методических указаниях по взиманию платы за загрязнение окружающей природной среды», в том числе рассматриваются такие объекты захоронения отходов как несанкционированные свалки, представляющие собой территории, не предназначенные для размещения отходов [18]. На свалках такого типа отходы размещаются без проведения работ по захоронению, уплотнению, изоляции отходов и контроль их эксплуатации не производиться.

Важной характеристикой свалок является их размер. В зависимости от этого критерия полигоны ТКО делят на:

– крупные (площадь превышает 16 га). Подобные свалки очень часто имеют промышленный или смешанный тип мусора и способны оказывать значительное техногенное воздействие на все окружающие природные среды. Зона эмиссии может достигать 1,5 км.

– средние (площадь составляет 4 – 16 га). На полигонах такого типа так же сохраняется высокая опасность загрязнения окружающей местности токсичными веществами с протяженностью влияния примерно 800 – 900 м.

– малые (площадь не превышает 4 га). Зона техногенного воздействия составляет 500 – 600 м.

По геоморфологическим признакам различают свалки в понижениях рельефа (с обвалованием и без него), равнинные (отвальные) и прислоненные к склонам (рисунок 1.5) [19].

Этот критерий во многом определяет, степень экологической безопасности объектов размещения отходов для окружающей среды.

Согласно современным российским стандартам для обеспечения безопасного захоронения отходов необходимо руководствоваться следующими принципами:

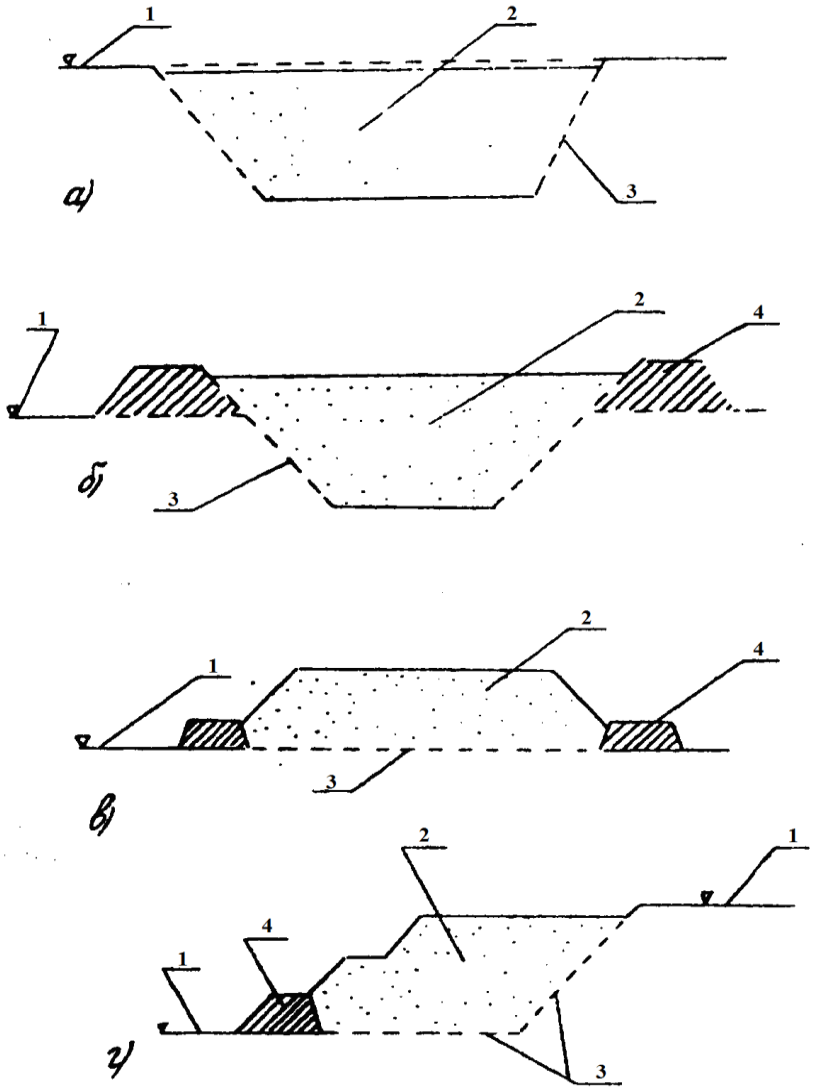



Рисунок 1.5 – Типы свалок по геоморфологическим признакам [19]:
а – котлованный; б – овражный; в – равнинный (отвальный); г – косогорный
1 – земная поверхность; 2 – отходы; 3 – экранирование ложа; 4 – ограждающая дамба

– размещение полигонов должно быть на достаточном удалении от потенциальных источников воздействия (населенные пункты, поверхностные водные источники, горизонты подземных вод, и т. д.);

– запрет на размещение полигонов на природоохранных территориях, подтопляемых территориях;

– строительство защитных барьеров, препятствующих попаданию загрязняющих веществ в окружающую среду (противофильтрационный экран, верхнее рекультивационное покрытие).

Применение этих принципов при создании системы обращения с отходами и введение строгих технических требований к объектам депонирования отходов позволит уменьшить или предотвратить их негативное воздействие на окружающую среду [9, 20–22].

Решение проблемы экологической безопасности объектов складирования ТКО должно быть основано на детальном анализе их существующего состояния с использованием методов экологического мониторинга. Полученная информация необходима для прогноза состояния полигонов ТКО и является основанием для принятия решений по управлению данными объектами.

## 1.2. Анализ воздействия объектов захоронения отходов на элементы экологических систем

Объекты депонирования отходов представляют огромную угрозу экологическому равновесию природной среды. Разложение органического вещества мусора происходит в течение многих десятков лет. В результате этого процесса образуются зловонные газы и фильтраты, загрязняющие водный и воздушный бассейны территорий населенных мест.

Большое влияние на характер процессов взаимодействия экосистемы полигона ТКО с окружающей средой оказывают внешние (климатические параметры) и внутренние (состав отходов, технология захоронения отходов и т.д.) факторы. Таким образом, в массиве объектов депонирования отходов протекают следующие основные процессы [23]:

– поступление веществ в систему полигона, которое происходит в течение всего эксплуатационного этапа и завершается после закрытия полигона;

– трансформация веществ в теле полигона, протекает как на этапе эксплуатации полигона, так и после него;

– миграция веществ в окружающую среду, наблюдаются в период эксплуатации полигона и на постэкплуатационном этапе.

Полигон ТКО являясь природоохранным сооружением для складирования отходов, и с одной стороны играет роль защиты почвы, атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод от загрязнений, а с другой стороны действуя как биореактор, в котором протекают процессы разложения мусора, способствует эмиссиям загрязнений в окружающую среду.

К основным видам воздействия полигона захоронения отходов можно отнести:

– поступление загрязняющих веществ в атмосферный воздух за счет образования биогаза;

– шум, возникающий при работе технологического транспорта;

– загрязнение почв и подземных вод.

Разложение бытовых отходов, как правило, происходит в анаэробных условиях, без доступа воздуха. В результате биохимических реакций выделяется биогаз, содержащий метан, сернистый газ, оксиды азота, пары растворителей продукты горения и т.д., которые способны токсически воздействовать на организм человека. Образованию биогаза способствует пористое строение тела полигона ТКО, создающее благоприятные условия для развития биохимических и физико-химических процессов разложения отходов в анаэробных условиях.

Распад органической составляющей твердых отходов на свалках происходит в пять фаз:

1) аэробное разложение;

2) анаэробное разложение без выделения метана (кислое брожение);

3) анаэробное разложение с непостоянным выделением метана (смешанное брожение);

4) анаэробное разложение с постоянным выделением метана;

5) затухание анаэробных процессов.

Первая и вторая фаза имеют место впервые 10 – 15 суток с момента укладки отходов. Продолжительность протекания третьей фазы – от 6 до 17 месяцев. Длительность четвертой фазы 10 – 30 лет и более, если условия складирования не изменяются [24, 25, 27]. На этой стадии наблюдается стабилизация биохимических процессов, уменьшается скорость и уровень распространения метана, при этом ведущим компонентом загрязнения окружающей среды являются фильтрационные воды [16].

Фильтрат образуется в результате взаимодействия отходов с проникающими в тело свалки атмосферными осадками и представляет собой высокотоксичную жидкость с минерализацией 11–17 г/л [27]. Химический состав фильтрата полигонов ТКО в большинстве случаев включает органический углерод, азот аммонийный, азот нитратный, хлорид-ион, сульфат-ион, ряд металлов (калий, кальций, магний, железо общее, марганец, медь, цинк) [28–30]. Многие исследования показали, что содержание аммонийного азота в фильтрационных водах снижается очень медленно [16, 31–33]. Многие неорганические соединения (например, хлориды, сульфаты) определяются в фильтрате в течение долгого периода времени после закрытия свалки [16, 32–34]. Тяжелые металлы обнаруживаются в фильтрационных водах в низких концентрациях [16, 35, 36].

В процессе эксплуатации полигона ТКО фильтрационные воды контактируют с незагрязненными подземными водами и породами водоносного пласта. В результате такого взаимодействия происходят следующие процессы: задерживание веществ, разбавление воды, молекулярная диффузия, фильтрационная дисперсия, поглощение отдельных компонентов (физическая, химическая сорбция), газовыделение, растворение твердой породы и др. Перечисленные процессы являются причиной изменения первоначального химического состава перемещающихся в водоносном пласте подземных вод. Однако одни элементы могут полностью

или частично элиминироваться из воды (в результате механической задержки, сорбции, осаждения, распада), а содержание других возрастает. Некоторые ингредиенты появляются вновь вследствие процесса выщелачивания солей из породы, реакции гидролиза, комплексообразования и других. Неопределенно долгий период времени в водоносном пласте могут мигрировать химические вещества, не испытывающие физико-химических превращений в подземных водах. Ареал распространения загрязнений определяется составом и концентрацией химических веществ, состава подземных вод, строения и состава водоносных пород и др. [37]. Анализ большинства исследований позволил определить, что ведущими рисками «старых» свалок и полигонов ТКО, не оснащенных инженерными системами защиты от загрязнений, связаны с их длительным (десятки лет). воздействием на окружающую среду за счет проникновения фильтрата в подземные и поверхностные воды. Поэтому для таких объектов захоронения отходов необходимо проведение мониторинга прилегающей территории, являющего основанием для разработки мероприятий по управлению эмиссиями в течение всего периода функционирования и после завершения эксплуатации полигона.

## 1.3. Анализ подходов к мониторингу объектов захоронения отходов

Эксплуатация объектов захоронения коммунальных отходов тесно связана с изучением их экологической безопасности для окружающей среды. Поэтому объективно возникает вопрос об оценке объема, динамики эмиссии и распространения загрязняющих веществ, что позволит учесть эти процессы при разработке проектов современных объектов утилизации отходов.

Для оперативного управления полигонами ТКО необходима объективная, достоверная и актуальная информация о степени их влияния на отдельные элементы окружающей природной среды. Получение данных сведений является одной из задач мониторинга биосферы и необходимо для

составления прогноза развития ситуации в районе размещения объекта захоронения отходов под влиянием техногенных факторов.

Впервые термин «мониторинг окружающей природной среды» как «система повторных наблюдений одного или более элементов окружающей природной среды в пространстве и во времени с определенными целями в соответствии с заранее подготовленной программой» был введен экспертом Научного комитета по проблемам окружающей среды Р. Менном в 1971 г. [38]. Позднее в 1972 г. на Стокгольмской конференции ООН по проблемам окружающей среды американские исследователи Томас Малон и Гильберт Уайт предложили под «экологическим мониторингом» понимать «систематические наблюдения за состоянием окружающей среды, возможные изменения в связи с антропогенной деятельностью, контроль таких изменений и проведение мероприятий по управлению окружающей средой» [39, 40].

В нашей стране одним из основоположников теории мониторинга является академик РАН Ю.А. Израэль, который уточняя определение мониторинга, акцентировал внимание не только на наблюдении, но и прогнозе состояния биосферы. По его мнению, "под мониторингом состояния природной среды, и в первую очередь загрязнений и эффектов, вызываемых ими в биосфере, подразумевают комплексную систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния биосферы или ее отдельных элементов под влиянием антропогенных воздействий" [41, 42].

Мониторинг включает в себя четыре, логически связанные между собой составляющие (рисунок 1.6):

– наблюдения,

– оценка фактического состояния,

– прогноз изменения окружающей среды,

– оценка прогнозируемого состояния [43].

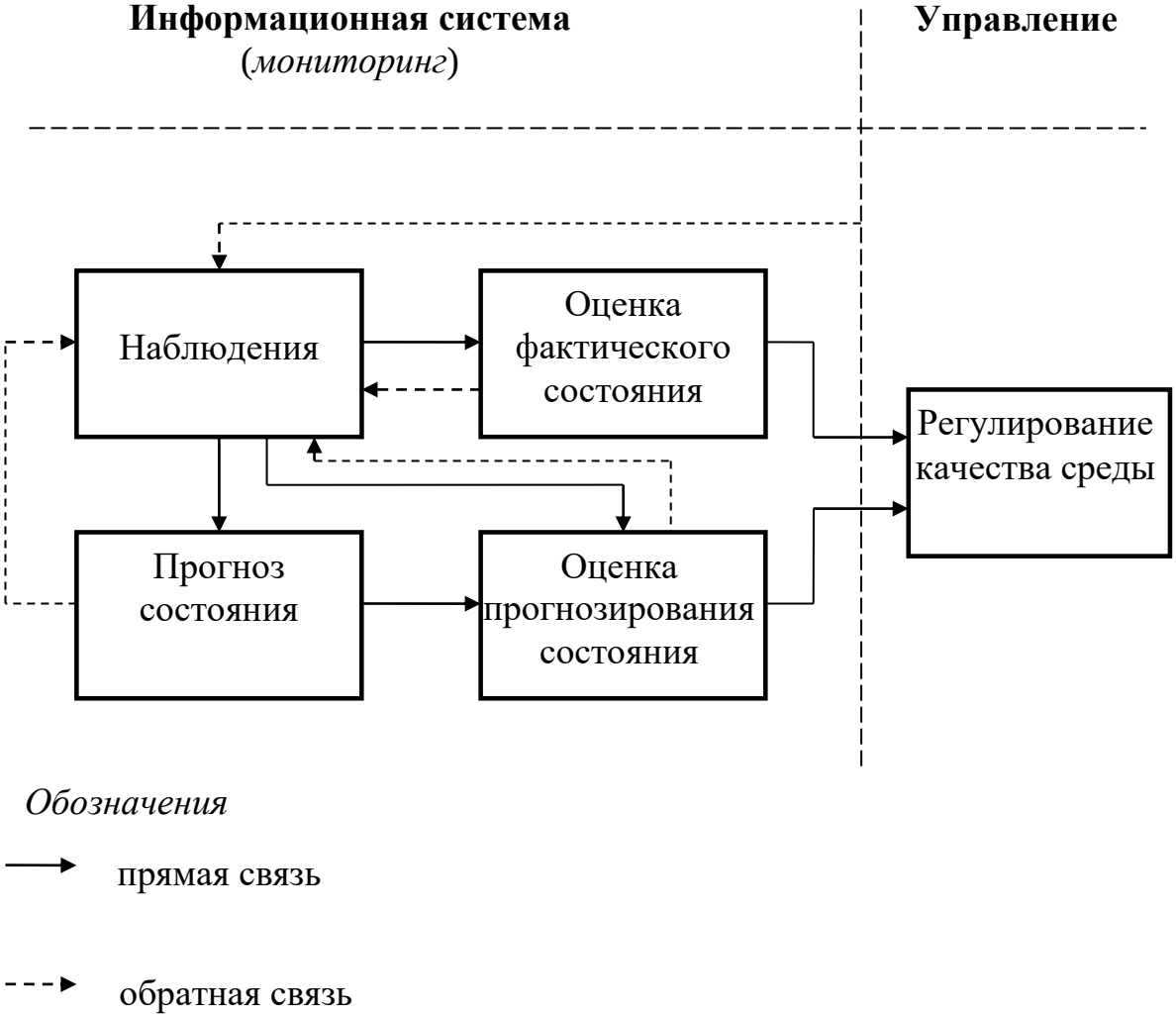



Рисунок 1.6 – Блок- схема системы мониторинга [41]

В проводимых исследованиях будем рассматривать факторы, влияющие на процесс эмиссии загрязнений от объекта размещения отходов, а также развитие экологической ситуации в отношении составляющих окружающей природной среды.

Необходимо подчеркнуть, что в вопросе анализа развития ситуации в окружающей природной среде, важным элементом является прогнозирование на основе, в том числе наблюдений за ее фактическим состоянием. Можно сказать, что мониторинг служит основой системы управления качеством окружающей природной среды, а получаемая при этом информация необходима для принятия управленческих решений.

В отдельных случаях при организации мониторинга приходиться решать несколько задач различного уровня. Поэтому отечественный теоретик в области мониторинга И.П. Герасимов предложил выделить в системе мониторинга три ступени:

– биоэкологический (санитарно-гигиенический), направленный на наблюдение за параметрами окружающей среды с точки зрения их влияния на здоровье человека;

– геосистемный (природно-хозяйственный), предназначенный для определения состояния природных и техногенных систем.

– биосферный (глобальный), позволяющий установить глобальные (фоновые) параметры природной среды для всей планеты в целом [38, 44].

К основным задачам мониторинга полигона ТКО можно отнести:

– наблюдение и оценка изменений состава, структуры, динамики экосистемы полигона;

– разработка средств и методов контроля изменений окружающей среды;

– развитие системы моделирования и прогнозирования состояния окружающей среды;

– разработка системы управления полигоном ТКО.

Согласно российским стандартам [45] мониторинг полигона ТКО включает:

– мониторинг состояния и загрязнения грунтовых вод;

– мониторинг состояния и загрязнения поверхностных вод;

– мониторинг состояния и загрязнения атмосферного воздуха;

– мониторинг состояния и загрязнения почвенного покрова;

– мониторинг состояния и загрязнения растительного покрова.

Основной целью мониторинга объектов захоронения отходов является сбор достоверных, регулярных, оперативных сведений о состоянии компонентов окружающей природной среды, что необходимо для решения проблемы экологической безопасности населения, проживающего в

непосредственной близости с территорией полигона ТКО, а также обслуживающего его персонала.

Следует отметить, что в рамках мониторинга необходимо вести как периодические (регулярные), так и непериодические (внеплановые) наблюдения за состоянием воды, почвы, растительности в районе размещения полигона ТКО. Например, воздуха в случае пожара на полигоне, вод после сильных ливней, размывающих поверхность полигона и пр.

Специфической особенностью мониторинга за развитием экологической ситуации на территории «старых» свалок и полигонов является, то, что основным фактором их воздействия на окружающую природную среду является фильтрат. Основной риск в этом случае, связан с тем, что часто «старые» свалки и полигоны отходов не имеют нижнего гидроизоляционного материала, что способствует эмиссии загрязнений. Поэтому при комплексных наблюдениях за данными объектами основное внимание уделяется мониторингу подземных вод.

Программа мониторинга загрязнения подземных вод, должен включать следующие компоненты:

– Контрольные скважины, расположенных: выше полигона ТКО по течению грунтовых вод, определяющая фоновое состояние примыкающей территории и ниже полигона по направлению течения подземных вод, предназначенных для отбора проб воды для обнаружения стоков полигона. Основное назначение данного компонента – сбор информации о состоянии подземных вод.

– Посты отбора поверхностных вод, предназначенные для отбора проб воды поверхностных источников, расположенные выше и ниже полигона ТКО по течению водотока или на определенном расстоянии от полигона ТКО в случае водоемов в зависимости от хозяйственного назначения водного объекта.

– Специализированная экологическая лаборатория химического анализа, направленная на определение в подземных водах загрязняющих веществ. В

отобранных пробах грунтовых и поверхностных вод определяется содержание аммиака, нитритов, нитратов, гидрокарбонатов, кальция, хлоридов, железа, сульфатов, лития, ХПК, БПК, органического углерода, pH, магния, кадмия, хрома, цианидов, свинца, ртути, мышьяка, меди, бария, сухого остатка. Пробы также исследуются на гельминтологические и бактериологические показатели. Если в пробах, отобранных ниже по потоку, устанавливается значительное увеличение концентраций определяемых веществ по сравнению с контрольным, необходимо по согласованию с контролирующими органами расширить объем определяемых показателей, а в случаях, если содержание определяемых веществ превысит ПДК, следует принять меры по ограничению поступления загрязняющих веществ в грунтовые воды до уровня ПДК [46].

– Специализированный информационный центр, который в зависимости от программного обеспечения обеспечивает анализ полученных сведений о состоянии окружающей среды в районе размещения полигона ТКО, формирует базы данных, заполняет отчетную документацию, выполняет математическое моделирование экологической ситуации в районе расположения исследуемого объекта, проводит ее анализ и оценку.

– Информирование специально уполномоченных органов и структур по охране окружающей среды.

Описанные компоненты применяются при реализации существующих процессов экологического мониторинга (рисунок 1.7).

Так, компоненты «Контрольные скважины», «Посты отбора поверхностных вод» и «Специализированная экологическая лаборатория» применяются в подпроцессе «Наблюдения», «Центр обработки информации» используется в подпроцесссах «Формирование отчетов», «Оценка состояния», «Моделирование и прогнозирование ситуаций», «Информирование специально уполномоченных органов и структур по охране окружающей среды» соответствует подпроцессу «Связь с внешней средой».

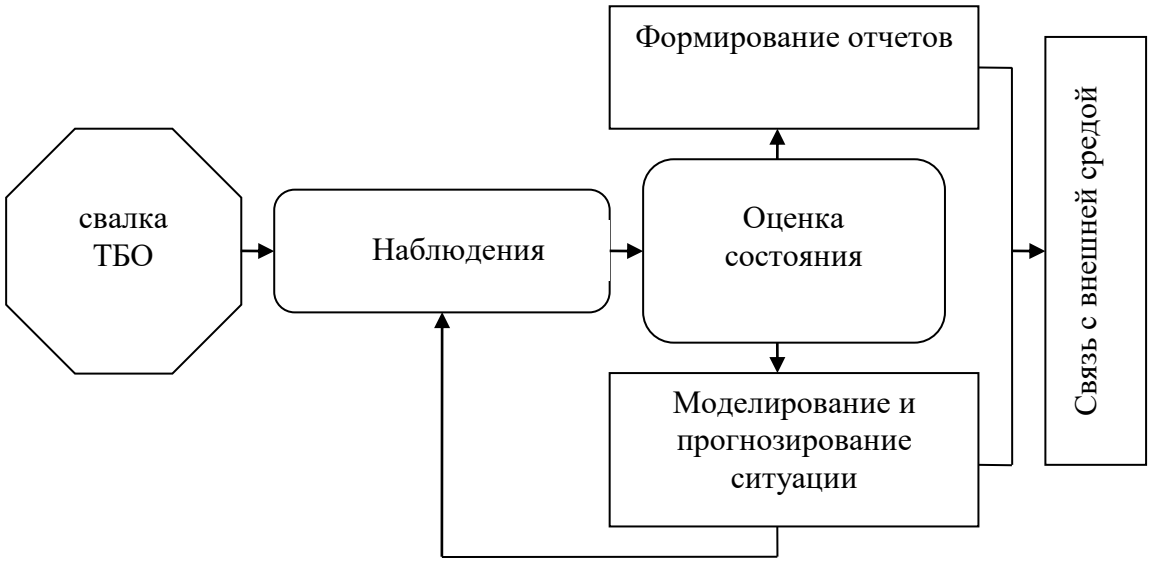



Рисунок 1.7 – Текущий процесс экологического мониторинга объекта захоронения отходов [47,48]

Ведущим процессом экологического мониторинга подземных и поверхностных вод является подпроцесс «Наблюдения», поскольку на этом этапе получают исходную информацию для реализации программы наблюдений и анализа загрязнения массива полигона ТКО.

Существующий метод формирования программы мониторинга (рисунок 1.8) основан на проведении наблюдений на территории массива полигона ТКО в местах, подверженных наибольшему загрязнению.

Риск загрязнения подземных и поверхностных вод оценивается на основе сравнения концентраций загрязняющих веществ, полученных при экологическом мониторинге с безопасными предельно допустимыми значениями [49 –51].

На основании мониторинга окружающей среды для принятия эффективных решений по управлению объектами депонирования отходов, необходимо иметь механизм, позволяющий систематизировать и структурировать имеющуюся информацию, исследовать альтернативные варианты решений и выбрать из них наиболее приоритетные.

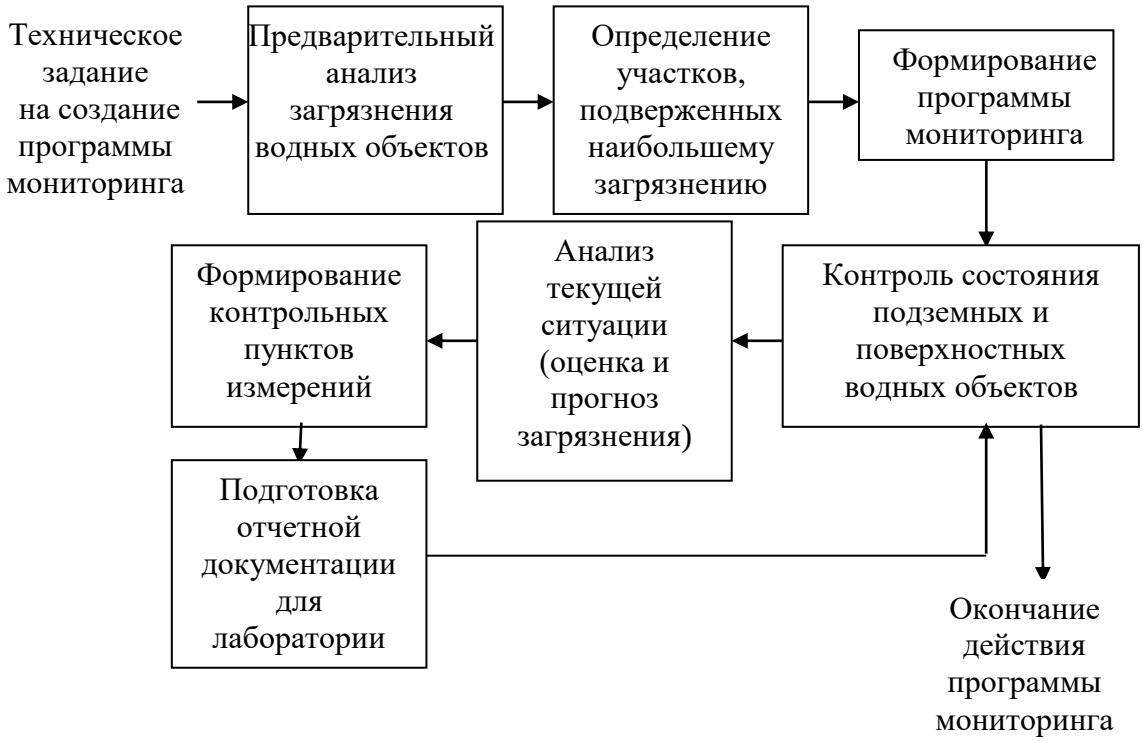



Рисунок 1.8 – Текущий процесс формирования программы мониторинга

В этом случае, для повышения адекватности используемых математических моделей, необходимо учитывать неоднозначность реализации таких программ и использовать, и развивать методы и интеллектуальные модели обработки информации [52 – 55].

## 1.4. Обзор системных представлений о формализации объектов захоронения отходов

На современном этапе опыт развития естествознания, в частности экологических исследований природно-технических систем, свидетельствует, что мониторинг (наблюдения) и эксперимент в наибольшей степени способствуют познанию только тогда, когда они задуманы и осуществлены на основе научной теории.

Объект депонирования отходов представляет собой некую природно-техническую систему, состоящую из совокупности определенных элементов, связанных между собой в единое целое [56].

Одной из основных категорий теории познания и исследования сложных систем, таких как полигоны ТКО является моделирование.

Модель – это система, воспроизводящая определенные стороны, связи и функции исследуемого объекта (явления), более доступная для изучения и позволяющая получить новую информацию о моделируемом объекте.

Существует множество методов моделирования, из которых наибольшее распространение получили физическое, аналоговое, математическое, также разновидность последнего – имитационное моделирование.

Физическое моделирование состоит в том, что объект и его модель являются элементами одной физической природы и отличаются лишь размерами. Аналоговое моделирование заключается в том, что объект и его модель имеют совершенно разную физическую природу, но описываются одинаковыми математическими уравнениями. Математическое моделирование представляет собой приближенное описание какого-либо явления (процесса), выраженное с помощью математической символики. Имитационное моделирование состоит в изучении сложной математической модели с помощью экспериментирования на компьютере.

Математическое моделирование является наиболее перспективным в изучении сложных природно-технических объектов, где необходимо учитывать большое разнообразие исходных данных, меняющиеся значения внутренних и внешних параметров системы, многовариантные режимы работы, выбор управленческих решений [57].

Основными особенностями моделирования объектов окружающей среды являются принципы системности, к которым относятся принципы интегратизма, неопределенности, инвариантности и основной деятельности.

Принцип интегратизма заключается в том, что взаимодействие части и целого характеризуется сочетанием трех элементов:

– взаимодействие систем – связи среди элементов целого;

– потеря некоторых свойств элемента при входе в целое;

– появление новых свойств у целого, обусловленных свойствами составных элементов [58].

Этот принцип сходится с известным позицией У. Эшби [59], который рассматривает общую теорию систем как общую теорию управления.

Принцип неопределенности предполагает, что вдоль границы системы экологические процессы являются расплывчатыми и неопределенными. Для них характерна систематическая вариабельность во времени, в результате чего основные характеристики объекта могут быть получены только в исследуемый момент времени и в данной ситуации.

Принцип инвариантности состоит в том, что модель объекта должна быть инвариантна для любых территорий, технических объектов и изменение каких-либо условий не должно менять суть модели.

Принцип главных видов деятельности заключается в том, что у разных экологических систем имеются схожие функции (управление, регулирование, распределение и т.п.) которые можно выделить как типовые или стандартные.

При представлении природно-технических объектов в виде систем и их моделировании следует принимать во внимание, то, что они имеют определенные общие характеристики:

– целостность, заключающаяся в сохранении стабильных отношений между элементами системы, при этом состояние любого элемента зависит от состояния всей системы, и наоборот;

– устойчивость, характеризующая свойство системы выдерживать изменения, создаваемые внешними воздействиями, обладать способностью к восстановлению или самовосстановлению;

– разнообразие, заключающееся в том, что каждый элемент системы обладает определенной индивидуальностью, состоянием, поведением, что отражает ее гетерогенность;

– неопределенность, состоящая в том, что при наблюдении за системой невозможно одновременно зафиксировать все ее свойства и зависимости

между ее элементами, что вызывает необходимость системного исследования объекта;

– адаптация, характеризующая сохранение системой состояния равновесия, устойчивости к внешним воздействиям, за счет изменения внутренней структуры и функций некоторых элементов, что обеспечивает ее эволюцию [58].

Системный экологический анализ позволяет исследовать характер, формы и масштабы взаимосвязей и взаимодействий, проанализировать устойчивость и адаптацию сложных природно-технических объектов, таких как полигоны ТКО. В качестве основного инструментария системного экологического анализа используют математическое моделирование, позволяющее изучить экологические процессы и приблизиться к осуществлению практических решений по их управлению. Существуют следующие типы математических моделей экологических систем:

– модели, основанные на фундаментальных законах материального мира (закона сохранения энергии, массы, количества движения, переноса и др.). При этом выбираются важнейшие законы для конкретного объекта, производится их формализованная запись, решаются уравнения, и интерпретируются решения. Такие модели содержат как априорную информацию, содержащуюся в структуре математической модели (тип дифференциального, разностного, балансового и другого уравнения), так и информацию, содержащуюся в параметрах (коэффициентах) модели, которые определяются на основе экспериментальных данных. При отсутствии полевых данных о коэффициентах исследование решений математических уравнений модели не позволит получить качественные количественные прогностические результаты.

– модели, основанные на установлении закономерностей функционирования экологических систем путем статистического выявления взаимосвязей в этих системах или объектах. Разработка подобных моделей заключается в выборе метода статистического анализа, планировании

процесса получения контрольных сведений, систематизации данных об экологической системе, проведении алгоритмизации и расчета статических связей с использованием программных систем. Статическое нахождение математической модели включает в себя выбор модели и определение ее параметров. При этом желаемой функцией может быть либо функция одной переменной (однофакторная), либо множества переменных (многофакторная). Формируя статистическую гипотезу о той или иной природно-технической системе, необходимо иметь массив разнообразных данных (базу данных), которые могут быть бесконечно большими. Адекватное представление о системе в этом случае связано с отделением важной информации от ничего незначащей. Для ограничения сведений используют методы наименьших квадратов, главных компонент и других.

– имитационные модели, комбинирующие принципы первого типа моделей и практика разработки второго типа моделей. Имитационное моделирование заключается в исследовании разнохарактерных математических моделей путем проведения экспериментирования с моделью с использованием компьютерных систем моделирования и обработки результатов экспериментов.

Имитация позволяет воссоздать причинно-следственные связи экологических явлений и процессов, что позволяет не только теоретически изучить поведение сложных систем, но исследовать альтернативные стратегии управления природно-техническими объектами [57].

### 1.4.1. Математическое моделирование миграции загрязнений в почвогрунтах природно-технических систем утилизации отходов

Для решения задач количественного описания процессов миграции загрязнений в почвогрунтах существует несколько подходов:

– макроскопический, позволяющий представить систему в виде протяженной гомогенной среды, имеющей макроскопические

характеристики, которые можно определить с помощью методов математического и физического моделирования [60, 61];

– микроскопический, основанный на описании процесса переноса веществ на уровне порового пространства, детализируя структуру пористой среды. Модели, получаемые на основе данного подхода, часто называют математическими моделями с “двойной пористостью” [62–64];

– молекулярный, предполагает рассмотрение дисперсной системы как комплекса молекул, ионов и атомов, взаимодействие которых подчиняется законам классической или квантовой механики [65, 66].

Для прогноза переноса веществ в почвогрунтах наибольший интерес представляет первый подход, который основан на представлении о движении жидкой фазы почвы как сплошной среды с осредненными характеристиками потоков компонентов этой фазы. Поэтому именно он был использован в работе для оценки миграции загрязнений в почвогрунтах.

### 1.4.2. Процессы миграции загрязнений в почвогрунтах

Химический состав подземных вод очень разнообразен, поскольку процесс его формирования зависит от ряда природных, техногенных и антропогенных факторов. Загрязненные воды, таким образом, представляют собой раствор, содержащий обычно несколько растворенных компонентов и имеющий повышенную концентрацию.

Поступающие в водоносный пласт загрязненные воды, атмосферные осадки и воды поверхностных водотоков и водоемов вытесняют чистые подземные воды и перемещаются в пласте по направлению общего фильтрационного потока.

Анализ литературных источников показал, что к основным факторам, оказывающим существенное влияние на миграцию ингредиентов, относятся конвективный перенос, диффузия и сорбционные процессы.

В природных условиях конвективный перенос осложняется гидродисперсией, молекулярной диффузией, и обменными процессами, в результате на фронте движения раствора формируется переходная зона, отличительной особенностью которой является переменная концентрация вещества по длине потока. Для определения суммарного влияния гидродисперсии и молекулярной диффузии на перенос компонентов используется.

$$D_i = D_M + \lambda_i |v_i| \qquad (i = 1, 2, 3), \qquad (1.1)$$

где $D_i$ – коэффициент конвективной диффузии, м$^2$/сут; $D_м$ – коэффициент молекулярной диффузии, м$^2$/сут; $\lambda_i$ – коэффициент гидродисперсии, м; $v_i$ – проекции скорости фильтрации на оси координат, м/сут.

Значения коэффициента конвективной диффузии $D_i$ изменяются в интервале от $k \cdot 10$ до $k \cdot 10^{-3}$ м$^2$/сут ($1 \leq k \leq 10$), тогда как $D_м$ не превышает $10^{-4}$ м$^2$/сут, поэтому им часто пренебрегают и принимают $D_i \approx \lambda \left| v_i \right|$.

Коэффициент конвективной диффузии зависит от таких параметров как скорость течения жидкости в порах, извилистость путей миграции, соотношение объемов сквозных и застойных пор и др. В физико-химической гидродинамике выделяют коэффициенты продольной $D_{пр}$ и поперечной $D_п$ диффузии, соответственно вдоль и поперек потока. В природных условиях распространение загрязнений часто достигает значительных ареалов, поэтому основное внимание следует уделять вертикальным потокам влаги, т.е. одномерным потокам жидкости, что позволяет рассматривать продольный коэффициент гидродисперсии как ведущий расчетный параметр [67].

С учетом указанных допущений миграция веществ в почве описывается системой уравнений, представленной в источниках [68–70].

$$\begin{cases} n_a \dfrac{\partial C}{\partial t} = D \dfrac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \dfrac{\partial C}{\partial x} - \dfrac{\partial N}{\partial t} \\ \dfrac{\partial N}{\partial t} = \beta\left(C - C_p\right) \\ C_p = f\left(N_p, \alpha, \gamma\right) \end{cases} \tag{1.2}$$

здесь C(x, t), N(x, t) – массовые концентрации компонентов в подвижном поровом растворе и в почвенно-поглощающем комплексе (ППК) почвы соответственно; $C_p$, $N_p$ – те же параметры в условиях равновесия; v (t) – скорость фильтрации; n – пористость почвы; D – коэффициент конвективной диффузии; α, β, γ – экспериментальные константы обмена между раствором и твердой фазой почвы.

Первое уравнение системы выражает материальный баланс исследуемого вещества в элементе почвенного слоя. Второе представляет собой уравнение кинетики массообмена вместе с изотермой сорбции, которое отражает механизм сорбционного процесса.

В настоящее время для математического описания этих процессов используют изотермы типа Генри и Ленгмюра:

$$N_p = \frac{n_a \cdot C_p}{\alpha}, \tag{1.3}$$

$$N_p = \frac{N_{пр} \cdot C_p}{\left(k + C_p\right)}, \qquad C_p = \frac{N_{пр} \cdot k}{\left(N_{пр} - N_p\right)}, \tag{1.4}$$

где $C_p$, $N_p$ – равновесные концентрации исследуемого вещества в поровом растворе и поглощающем комплексе; $N_{пр}$ – предельное содержание иона в ППК; $n_a$ – активная пористость; α, k – экспериментальные постоянные.

Впервые количественное исследование процесса конвективной диффузии в активных пористых средах при наличии кинетики сорбции было проведено Лапидусом и Амудсеном [71], которые получили аналитическое решение системы уравнений (1.5), при граничном условии первого рода на

концах полуограниченной толщи среды и равномерном начальном засолении модельной среды:

$$\begin{cases} n_a \dfrac{\partial C}{\partial t} = D\dfrac{\partial^2 C}{\partial x} - v\dfrac{\partial C}{\partial x} - \dfrac{\partial N}{\partial t}, & 0 < x < \infty, \\ \dfrac{\partial N}{\partial t} = -\beta(\alpha N - n_a C), & 0 \le x \le \infty \end{cases} \quad (1.5)$$

где C (x,t) – концентрация сорбируемого иона в поровом растворе ммоль/дм$^3$; N (x,t) – концентрация того же иона в ППК, ммоль/дм$^3$; $\beta \approx \beta_1 v(t)$ – коэффициент скорости сорбционного обмена, 1/сут; $\beta_1$ = const – коэффициент пропорциональности 1/м; α – параметр распределения [67].

Позднее отечественные ученые [72, 73] предложили дифференциальное уравнение конвективной диффузии в частных производных для описания процессов перемещения и растворения солей в почвогрунтах.

$$\frac{\partial C}{\partial e} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_\phi \frac{\partial C}{\partial x} + \gamma(C_m - C), \quad (1.6)$$

где C – концентрация порового раствора, г/дм$^3$; t – время, сут; x – расстояние, м; $D^*$ – коэффициент конвективной диффузии, м$^2$/ сут, $v_ф$ = v /n – фактическая скорость движения воды в порах грунта, м/сут; v – скорость фильтрации, м/сут; γ – коэффициент растворения, 1/сут; $C_m$ – предельная концентрация насыщения.

Описанием процесса растворения солей и исследованием особенностей их перемещения под действием молекулярной и конвективной диффузии с использованием методов математической физики занимались также такие исследователи как В.Н. Аравин [72], С.Н. Нумеров [74], Б.С. Шержуков [75], и другие.

С.Ф. Аверьяновым [76] уравнение (1.7) для высокорастворимых солей с низким содержанием в твердой фазе почвы было упрощено путем элиминации в нем члена γ ($C_m$ – C). При этом им рекомендовалось применять уравнение (1.7) для оценки распространения легкорастворимых солей в

почвогрунтах для обоснования мероприятий по защите почв от засоления токсичными соединениями. Уравнение (1.7), записанное в форме

$$n_a \frac{\partial C}{\partial t} = \left(D_M + \lambda |v|\right) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}, \qquad 0 \le x \le L \tag{1.7}$$

часто применяется для количественного описания миграции в минеральных почвах несорбируемых компонентов водорастворимых веществ.

В дальнейшем исследования в области математического моделирования массопереноса веществ в подземных водах развиты в работах В.М. Шестакова, Ф.М. Бочевер, Я. Бэр [76–79], Э.Н. Бондарева, В.Н. Николаевского [80], В.Н. Лаврика, В.И. Пеньковского [81, 83], Ф.Д. Микайылова [84, 85], и многих других.

Изучением процессов совместной миграции влаги и растворенных в ней веществ занимаются многие исследователи [87, 89] и другие. В ряде работ зарубежных [90, 91] и отечественных [92] авторов рассматриваются математические модели перемещения веществ в неоднородных водоносных пластах. В работе [93] рассматривается перенос растворенного вещества, которое подвергается нелинейному гетерогенному влиянию.

Для решения проблемы обеспечения устойчивости процесса миграции загрязнений авторами [94] предлагается метод асимптотического движения загрязненных подземных вод. В работе [95] предложен метод численного решения нестационарных задач о движении двухкомпонентной жидкости в пористой среде, моделирующих перенос солей, растворенных в грунтовых водах.

В некоторых исследованиях [96–98] предлагается использовать для моделирования процесса массопереноса многократное увеличение масштаба. Однако неоднородность диффузионных условий в разных масштабах увеличивает число определяемых параметров модели.

Для прогнозирования миграции загрязнений в почвогрунтах в работах [99, 100] предлагаются трехмерные дифференциальные уравнения. Практическое применение их ограниченно из-за большого числа параметров,

необходимых для прогнозирования переноса веществ, зависящих от природы почвогрунта, природы ионов и т.д. Достоверное определение этих показателей во многих случаях задача более сложная, чем прогнозирование миграции веществ.

Школой профессора Д.Ф. Шульгина в Тверском государственном техническом университете [101–103] разработана двухмерная математическая модель процесса переноса солей фильтрационным потоком в почве учитывающая не только сорбционных явления, что позволяет решать как миграционные, так и гидродинамические задачи.

Использование различных математических моделей для прогнозирования миграции загрязнений, требует знания гидрохимических параметров, являющихся коэффициентами дифференциальных уравнений. Отсутствие надежных методик их определения по данным полевых и лабораторных опытов ограничивает практическое применение многих из приведенных выше моделей для прикладных задач.

Таким образом, применение систем моделирования переноса загрязнений от объекта захоронения отходов на достаточно продолжительный период времени позволяет накопить информацию в виде базы расчетных данных концентраций загрязняющих веществ в подземных водах. Сравнение расчетных баз данных с результатами мониторинга в наблюдательных скважинах дает возможность установить достоверность расчетных данных и оценить эффективность систем моделирования миграции загрязнений от полигона ТКО. Информация, полученная при анализе баз данных, может служить основой для принятия решений по управлению объектами депонирования отходов в конкретных условиях.

## 1.5. Анализ подходов к управлению природно-техническими системами депонирования отходов

Регулирование взаимосвязей в системе «полигон ТКО – окружающая среда» позволяет приблизиться к решению проблемы безопасного управления состоянием природно-технических систем депонирования отходов.

Управление состоянием объектов утилизации отходов подразумевает выявление наиболее эффективного элемента в цепи экосистемных связей, воздействие на которые позволит изменить течение природных процессов в желаемом направлении. Совокупность логически связанных между собой действий, приводящих к данному результату, представляет собой систему управления функционированием природно-технических объектов [104].

Для управления безопасным состоянием полигона ТКО необходимо решить следующие задачи:

– осуществление управленческой деятельности критическим состоянием природно-технической системы;

– поддержание эффективного состояния полигона, для обеспечения безопасного протекания процессов в экосистеме.

Для решения задачи первой группы применяют общую теорию систем, позволяющую исследовать явления и процессы абстрагируясь от их конкретной природы [105]. Задачи решаются с использованием моделей сплошных сред, теория которых основана на физических процессах (тепло-, массообмен и др.) [106, 107].

В области теории управления проблемам моделирования и идентификации технических объектов в России посвящены работы М.В. Аржакова [109], Н.С. Райбмана [110], Я.З. Цыпкина [111], В.В. Кафарова [108]. Развитию научных основ методов моделирования и идентификации за рубежом посвящены труды P. Eickhoff [112], L. Lyung [113].

Совершенствованием систем автоматизированного управления техническими объектами на основе подходов, реализующих алгоритмы

эффективного управления, посвящены работы П. Л. Логунова [114], В.О. Чинакал [115].

Разработкой подходов к управлению сложных природно-технических систем депонирования отходов на основе методов системного анализа занимаются многие исследователи, частности Н.И. Артемов [116], Т.Г. Середа [117], Н.С. Костырев [2], и многих других.

В настоящее время предложены и применяются методы управления распространением «свалочного» газа [118, 119] и формированием фильтрата [35, 120], в том числе разработаны методы управления объектом захоронения отходов как биологическим реактором [121, 122].

## 1.6. Постановка задачи исследования

Применение методов системного анализа в управлении природно-техническими системами ПТО позволяет исследовать и подойти к управлению объектом депонирования ТКО как системы, содержащей информацию, полученную, в результате лабораторных исследований и натурных экспериментов, которая накапливается и используется в моделирующих компьютерных комплексах.

В общем виде, с использованием теоретико-множественного подхода задача автоматизированного мониторинга свалки ТКО может быть представлена интегральной структурой (сценой) Ψ:

$$\Psi = \langle K, R, M, P, F \rangle, \qquad (1.8)$$

где $K = \{к_1, к_2, к_3\}$ – множество элементов системы мониторинга свалки,

$к_1$ – множество элементов контрольно-измерительного блока,

$к_2$ – множество элементов блока оценки и анализа экологической ситуации на объекте,

$к_3$ – множество элементов блока прогнозирования и развития экологической ситуации;

R = {Q, L} – совокупность компонентов внешних воздействий на элементы множества К,

Q – множество параметров управления элементами системы мониторинга свалки ТКО,

L – множество контролируемых в системе мониторинга показателей состояния объекта управления и параметров внешнего воздействия на него;

M = {$Z_1$, $Z_2$, $Z_3$} – множество состояний элементов системы мониторинга свалки К;

P = {p} – множество отображений на множество элементов системы мониторинга К, на совокупность параметров внешних воздействий на систему мониторинга R, множество состояний элементов к изменяющимся условиям внешней среды и параметрам состояния объекта. Это обеспечит сбор полной и достоверной информации, которая позволит выбрать рациональные и эффективные сценарии по управлению составляющими системы мониторинга [2, 141, 142].

Для эффективного управления объектом утилизации отходов и оптимизации затрат необходимо обосновать и выбрать такие параметры мониторинга и управления, которые в наибольшей степени отражают состояние природно-технической системы захоронения отходов.

Поскольку исследуемый полигон ТКО относится к категории «старых» свалок, то ведущим фактором, оказывающим влияние на состояние природно-технической системы, является фильтрат, а точнее, объем фильтрата, просачивающийся под основание свалки и проникающий в озеро. Поэтому мониторинг объекта утилизации отходов должен быть направлен, в первую очередь, на анализ водно-эмиссионных процессов, определяющих экологическую безопасность свалки, с целью устранения просачивания фильтрационных вод через основание полигона в подземные воды и, как следствие, в поверхностный водный объект.

Модель водного баланса полигона ТКО может быть представлена в виде полузакрытой системы входящих и выходящих водных эмиссионных

потоков, формирующихся под воздействием внутренних и внешних параметров (рисунок 1.9).

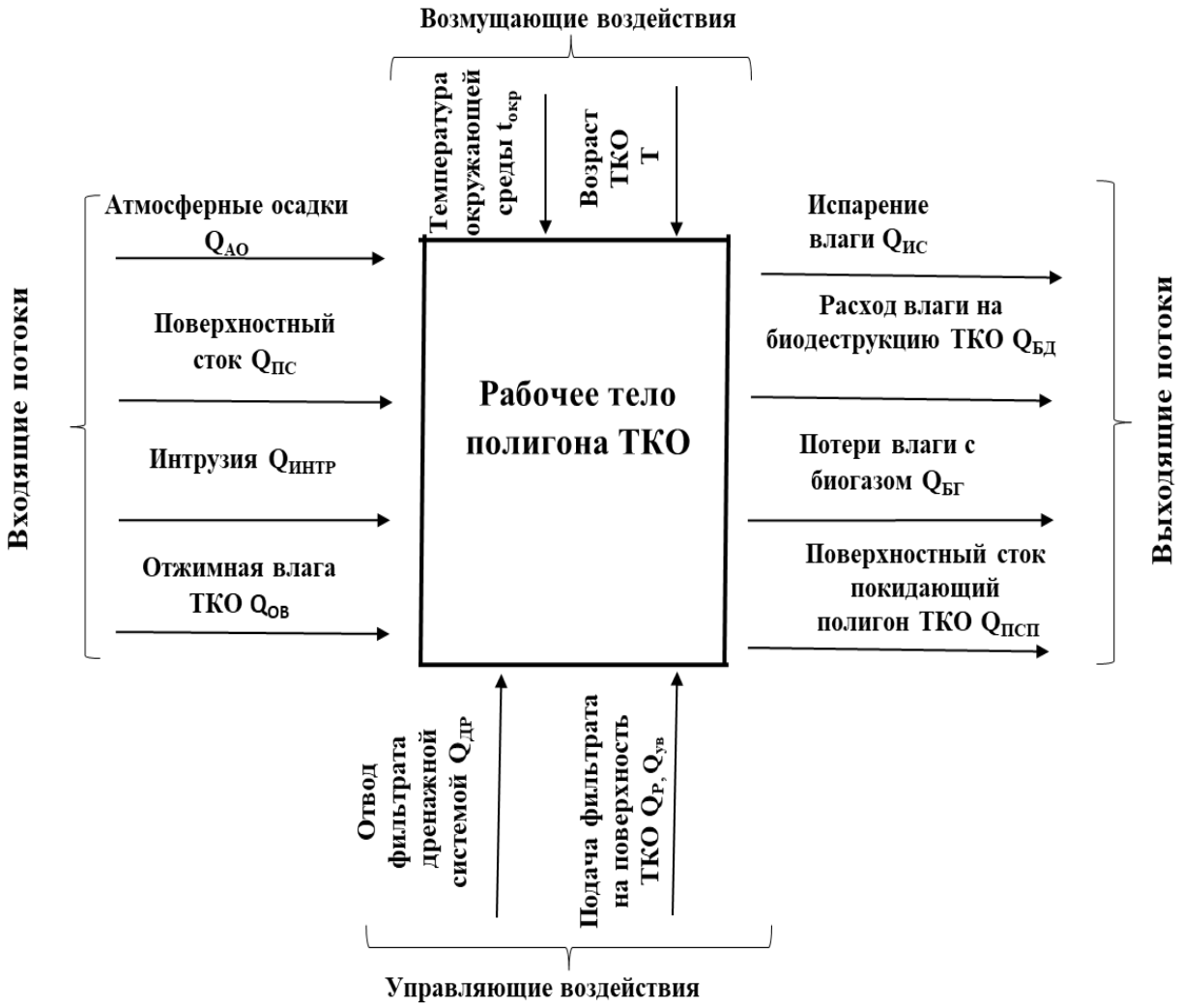



Рисунок 1.9 – Схема водного баланса объекта депонирования ТКО

Уравнение водного баланса будет иметь вид (1):

$$(Q_{АО} + Q_{ОВ} + Q_{ПС} + Q_{ИНТР}) = (Q_{ПСП} + Q_{БГ} + Q_{БД} + Q_{ИС} + Q_{ПР}), \quad (1.9)$$

где *входящие эмиссионные потоки*:

$Q_{АО}$ – количество атмосферных вод, поступающих на поверхность полигона ТКО;

$Q_{ОВ}$ – количество отжимной влаги, выделяющейся из отходов при их захоронении;

$Q_{ПС}$ – количество воды, поступающей с поверхностным стоком от территорий расположенных выше по рельефу;

$Q_{ИНТР}$ – количество воды, поступающей в тело полигона ТКО из подземных источников (интрузия);

*выходящие эмиссионные потоки*:

$Q_{ПСП}$ – количество воды, покидающей полигон ТКО с поверхностным стоком;

$Q_{БГ}$ – потеря влаги за счет выделения биогаза;

$Q_{БД}$ – количество воды, потребляемое в процессе биохимического разложения отходов;

$Q_{ИС}$ – количество воды расходуемое за счет ее испарения и на транспирацию растений;

$Q_{ПР}$ – количество воды инфильтрующейся из тела полигона ТКО в подземные горизонты.

*управляющие воздействия:*

$Q_{ДР}$ – отвод фильтрата дренажной системой;

$Q_{Р}$ – количество воды, направляемой для увлажнения массы отходов с последующей рециркуляцией образуемого фильтрата;

$Q_{УВ}$ – количество воды подаваемой на поверхность полигона ТКО для увлажнения отходов в пожароопасный период.

*возмущающие воздействия:*

$t_{окр}$ – температура окружающей среды;

Т – возраст отходов.

Для обеспечения экологической устойчивости при применении эффективного управления эмиссионными потоками объекта депонирования отходов необходимо с достаточной точностью определить объем образующегося фильтрата и его состав.

В общем виде задача определения объема фильтрата при недостатке достоверной информации о численных значениях всех параметров водного баланса, с точностью, достаточной для практического использования может быть представлена в виде [148]

$$V_{ф} = (Q_{АО} + Q_{ОВ}) - (Q_{ПС} + Q_{ИС} + Q_{БГ} + Q_{БД}), \quad (1.10)$$

где:

$V_ф$ – объем, образующихся в теле свалки фильтрационных вод, м.куб / ед. времени;

$Q_{АО}$ – количество атмосферных вод, поступающих на поверхность полигона ТКО, м.куб / ед. времени;

$Q_{ОВ}$ – количество отжимной влаги, выделяющейся из отходов при их захоронении, м.куб / ед. времени;

$Q_{ПС}$ – количество воды, поступающей с поверхностным стоком от территорий расположенных выше по рельефу, м.куб / ед. времени;

$Q_{БГ}$ – потеря влаги за счет выделения биогаза, м.куб / ед. времени;

$Q_{БД}$ – количество воды, потребляемое в процессе биохимического разложения отходов, м.куб / ед. времени;

$Q_{ИС}$ – количество воды расходуемое за счет ее испарения и на транспирацию растений, м.куб / ед. времени;

Временной интервал Т при определении этих объемов задается в сутках, неделях, месяцах, годах.

Для обеспечения экологической устойчивости при применении эффективных управлений эмиссионными потоками объекта депонирования отходов необходимо с достаточной точностью определить объем образующегося фильтрата и его состав.

Задача управления экологической безопасностью формулируется следующим образом: при заданных составляющих водного баланса свалки необходимо определить состав и минимальный объем части фильтрата, который необходимо отвести через дренажную систему на поселковые очистные сооружения, чтобы понизить уровень подземных вод под основанием свалки и, тем самым, предотвратить попадание загрязненной воды в озеро, т. е. определить min $V_ф$ при следующих условиях (1.11), (1.12).

$$V_ф = (Q_{АО} + Q_{ОВ}) - (Q_{ПС} + Q_{ИС} + Q_{БГ} + Q_{БД}) \longrightarrow \min \qquad (1.11)$$

или

$$V_ф = Q_{АО} - (Q_{ИС} + Q_{ПС}) \longrightarrow \min \qquad (1.12)$$

где:

$V_ф$ – объем, образующихся в теле свалки фильтрационных вод.

Определение min $V_ф$ является основой для управления водными эмиссионными потоками технической системы захоронения отходов с целью снижения техногенной нагрузки на объекты гидросферы.

## Выводы по первой главе

1. Решение проблемы экологической безопасности объектов утилизации отходов базируется на детальном анализе их существующего состояния с использованием методов экологического мониторинга. Полученная информация необходима для прогноза состояния полигонов ТКО и является основанием для принятия решений по управлению данными объектами.

2. Обобщены классификационные признаки объектов размещения отходов с позиции системного анализа.

2. В течение жизненного цикла объектов депонирования отходов под действием физических, химических и микробиологических процессов образуется фильтрат, определяющий воздействие полигона ТКО на компоненты окружающей природной среды.

3. Основные риски старых свалок и полигонов ТКО, не оснащенных системами экологической безопасности, связаны с их длительным (десятки лет) воздействием на окружающую среду за счет проникновения фильтрата в подземные и поверхностные воды.

4. Обобщены подходы к мониторингу объектов утилизации отходов. Ведущим процессом экологического мониторинга подземных и поверхностных вод является подпроцесс «Наблюдения», поскольку на этом этапе получают исходную информацию для реализации программы наблюдений и анализа загрязнения массива полигона ТКО.

5. Обобщены подходы к моделированию миграции в почвогрунтах. Представлены основные факторы, оказывающие существенное влияние на миграцию ингредиентов: конвективный перенос, диффузия и сорбционные процессы.

6. Для принятия и разработки управленческих решений обобщены подходы к безопасному функционированию объектов депонирования отходов.

7. Для эффективного управления экологической безопасностью объекта захоронения отходов обоснована значимость определения состава и минимального объема фильтрата полигона ТКО.

8. Произведена постановка научной задачи диссертационной работы.

# ГЛАВА 2 ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ

Для получения объективной информации о состоянии природно-технических систем необходимо располагать надежными методами изучения этих объектов. Основу экологических исследований составляют процессы анализа, эксперимента, концептуализации и проверки теории.

Ведущими подходами в изучении процессов и явлений являются:

– теоретическое мышление;

– наблюдение;

– проведение эксперимента;

– математические расчеты и обработка результатов [2].

Для изучения процессов, протекающих на объекте депонирования отходов, был выполнен анализ информационных данных по исследуемой проблеме и проведена серия экспериментов, для уточнения модели полигона ТКО.

## 2.1. Анализ исходных материалов объекта размещения твердых коммунальных отходов

Объектом исследования была выбрана свалка твердых коммунальных отходов (ТКО), расположенная в закрытом административно-территориальном образовании (ЗАТО) Солнечный Осташковского района Тверской области в северо-западной части острова Городомля, на территории предприятия "ЗВЕЗДА" (рисунок 2.1).

Остров Городомля находится на озере Селигер. Площадь участка захоронения ТКО составляет около 1 га, размерами 180х70 м. Участок находится на расстоянии примерно 50 – 60 м от уреза воды озера (рисунок 2.2). Постоянное складирование ТБО производилось с 1947 года. По своим размерам и составу складируемых отходов объект относится к малым

свалкам, а по условию эксплуатации классифицируется как насыпь, расположенная на поверхности земли.

Складирование производится непосредственно на достаточно хорошо фильтрующий, песчаный грунт, с пересыпкой изолирующим грунтом [27, 123].

Рисунок 2.1 – Карта-схема расположения полигона ТКО

В настоящий момент на объекте захоронения отходов накоплено около 30 тыс. м$^3$ отходов. Ежегодный расчетный объем образующихся отходов составляет 4787 м$^3$. Мощность имеющихся отходов варьирует от 0 до 25 м и составляет в среднем 1,3 – 1,5 м. Преобладающий состав отходов – бытовые.

Участок складирования ТКО расположен в нижней подошвенной части северного склона острова Городомля. От участка к урезу воды в озере рельеф понижается, а на запад, восток и юг от участка он в целом повышается, причем наиболее заметно в южном и восточном направлении.

Объект захоронения ТКО расположен в неблагоприятных гидрогеологических условиях, у подножия склона в водоохранной зоне озера Селигер и частично в прибрежной полосе. В районе участка геологический

разрез верхней толщи представлен достаточно мощным слоем песчаных отложений, преимущественно мелких и средних по гранулометрическому составу, озерно-аллювиального происхождения [27, 124].

На территории расположения объекта захоронения отходов вскрытая мощность песков составляет порядка 13 – 15 м. Повсеместно пески подстилаются озерными пылеватыми суглинками, постепенно переходящими в валдайскую морену, мощность которой составляет 20 – 25 м. Мощность водоносного горизонта составляет около 15 – 16 м. Грунтовые воды, в виде потока, движутся к урезу воды в северо-восточном направлении и имеют тесную связь с водами озера Селигер. Уровень грунтовых вод в пробуренных скважинах близок к поверхности земли и располагается в интервале 1,5 – 2,0 м. Направление их движения на северо-восток к озеру. Геолого-литологические разрез наблюдательных скважин представлен на рисунке 2.3. Анализ гидрогеологических условий показал, что разгрузка грунтовых вод под свалкой происходит в озеро Селигер. Фильтрационный поток с достаточной точностью можно считать прямолинейным по направлению от свалки к озеру, что в дальнейшем учитывается при математическом описании эмиссии ингредиентов в подземных водах.

Свалка практически со всех сторон окружена лесом. Состав древостоя преимущественно представлен сосной, елью, березой. К участку имеется подъездная дорога с восточной стороны. Свалка обвалована и оканавлена.

На свалке ТКО имеется система наблюдательных пунктов по контролю за влиянием объекта на окружающую среду [27].

Технологическая схема работы свалки ТКО представлена на рисунке 2.4.

Климатические условия территории полигона, расположенной вблизи озера Селигер, определяются континентальными и морскими воздушными массами умеренных широт. Господствует западный тип циркуляции.

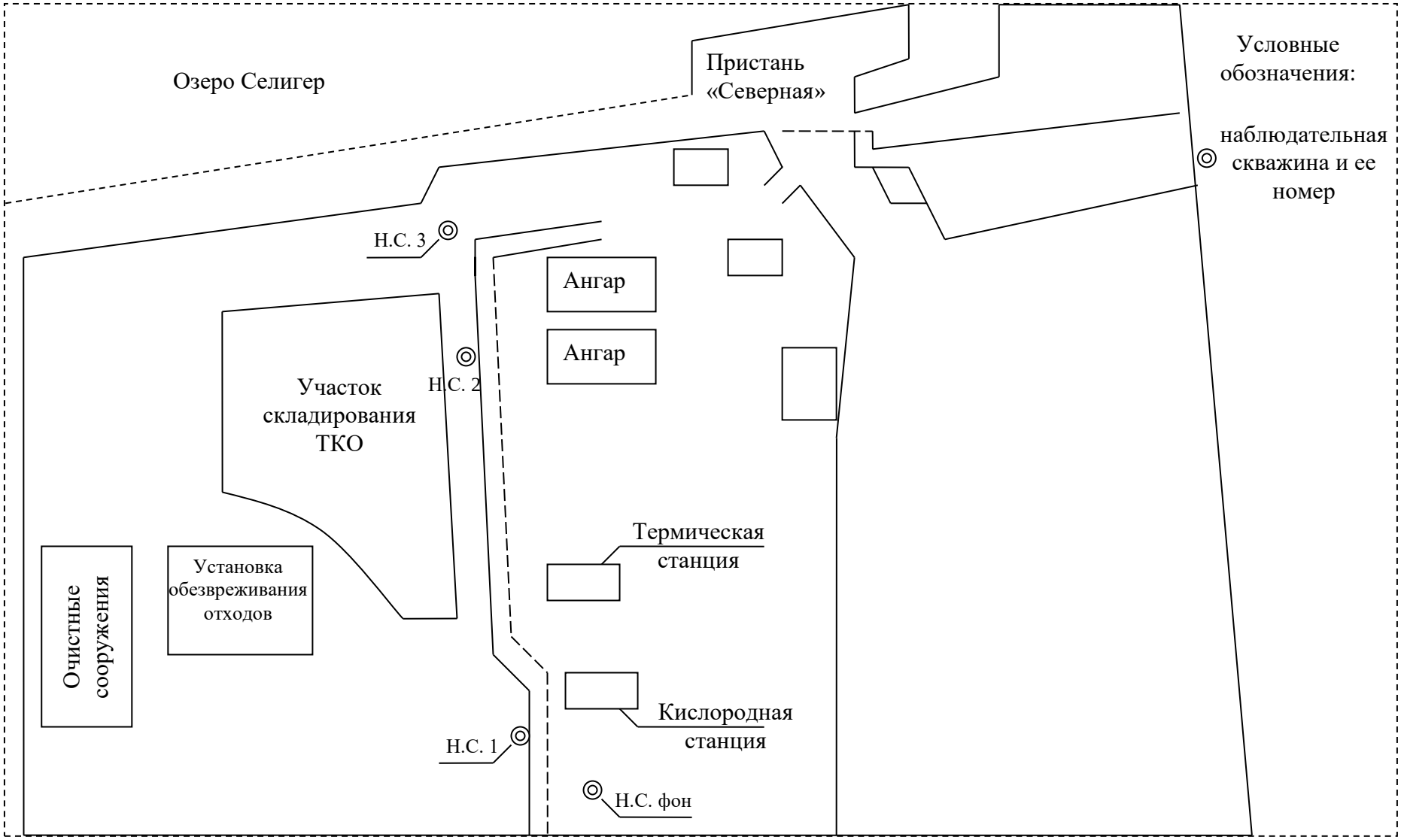



Рисунок 2.2 – Схема расположения полигона ТКО поселка Солнечный Тверской области

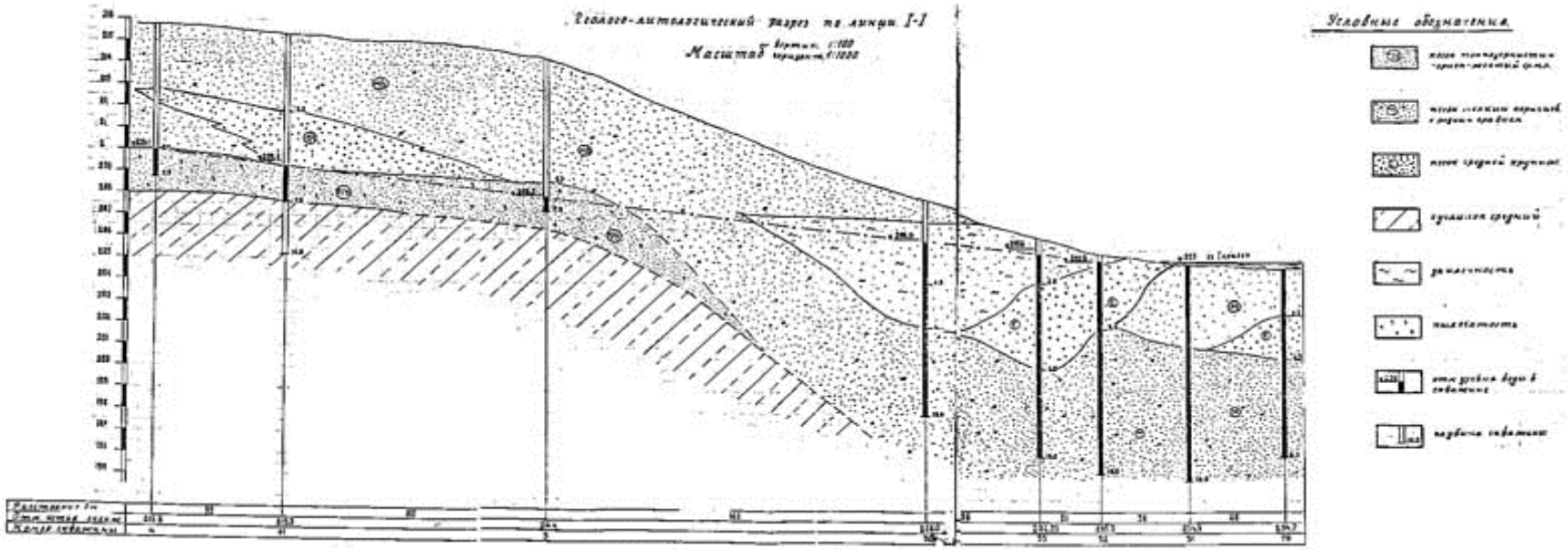



Рисунок 2.3 – Геолого-литологический разрез наблюдательных скважин

Следует отметить, что климатические условия района расположения полигона ТКО во многом определяются влиянием Валдайской возвышенности [125].

Ледостав наступает на Селигере в ноябре–декабре и до середины апреля – мая озеро сковано льдом.

Рисунок 2.4 – Технологическая схема процесса эксплуатации свалки

Осташковский район относится к зоне достаточного увлажнения. Среднегодовое количество осадков по данным Тверского центра гидрометеослужбы составляет 671 мм, а величина испарения – 479 мм.

Следует отметить особенность выпадения осадков в Осташковском районе в летний период, заключающуюся в меньшем количестве осадков по сравнению с соседними районами. Их количество составляет 200 – 225 мм. На территории сравнительно недалеко расположенного Торопецкого района за летний период осадков выпадает 250 – 300 мм. За апрель – май выпадает 70 – 85 мм осадков, за сентябрь – октябрь – 90...110 мм, за ноябрь – март – 150 – 200 мм.

Высота снежного покрова на третью декаду января достигает 35 – 40 см [123, 126].

Таким образом, в имеющихся климатических условиях (зона избыточного увлажнения) при складировании отходов в теле свалки образуется жидкая фаза – фильтрат, характеризующийся повышенным содержанием токсических веществ.

## 2.2. Методика обследования объекта

Для получения данных о текущем загрязнении природно-технической системы и определения значений, необходимых для оценки распространения загрязнений было выполнено обследование изучаемого объекта.

Фактический материал обследования объекта содержит данные, полученных на основе аналитического обзора и собственных экспериментальных исследований воздействия природно-технической системы утилизации отходов на окружающую природную среду, включая сведения о литолого-минералогическом составе и химическому составу отдельных компонентов объекта.

Для прогноза продвижения загрязнений в водоносных пластах и количественной оценки процесса взаимодействия загрязненных вод с природными подземными водами с помощью математических моделей требуются гидродинамические и физико-химические параметры пласта, а также данные о составе естественных подземных и загрязняющих вод.

В ходе полевых исследований на территории полигона ТКО были отобраны монолиты грунта. Для отбора монолитов использовался специальный пробоотборник, разработанный в Тверском государственном техническом университете на факультете «Природопользование и инженерная экология», на основе почвенного объемного бура БП-50 [67]. Из пробуренных скважин, глубиной до 1,5 м были взяты пробы грунтовых вод на полигоне, вблизи водоема (озеро Селигер) и на условно фоновой территории. Кроме того, был выполнен отбор проб воды в озере, в месте, где возможно выклинивание загрязнений от природно-технической системы утилизации отходов в водоем [27]. Места отбора монолитов почвы и проб грунтовых вод показаны на рисунке 2.5.

Анализ проб воды проводился согласно ГОСТов, ПНД Ф и стандартных общепринятых в химической практике методов, позволяющих провести лабораторные исследования в необходимом объеме. [127, 128]. Представительность проб зависела от соблюдения необходимых условий их консервации, транспортировки и хранения, в соответствии с нормативами.

Пробы воды исследовались на такие вещества, которые представляют наибольший интерес при прогнозировании распространения их в водоносном пласте, т.е. на содержание в фильтрате аммонийного азота, нитратного азота, хлоридов, сульфатов, калия.

Концентрация аммонийного азота определялась спектрофотометрическим методом, основанным на использовании в ходе анализа реактива Несслера [128–130].

Содержание нитратного азота определялось методом взаимодействия исследуемой воды с салицилатом натрия в сернокислой среде. Так как аммонийные и нитратные формы азота неустойчивы, их анализ проводился немедленно или пробы предварительно консервировались хлороформом [129, 130].

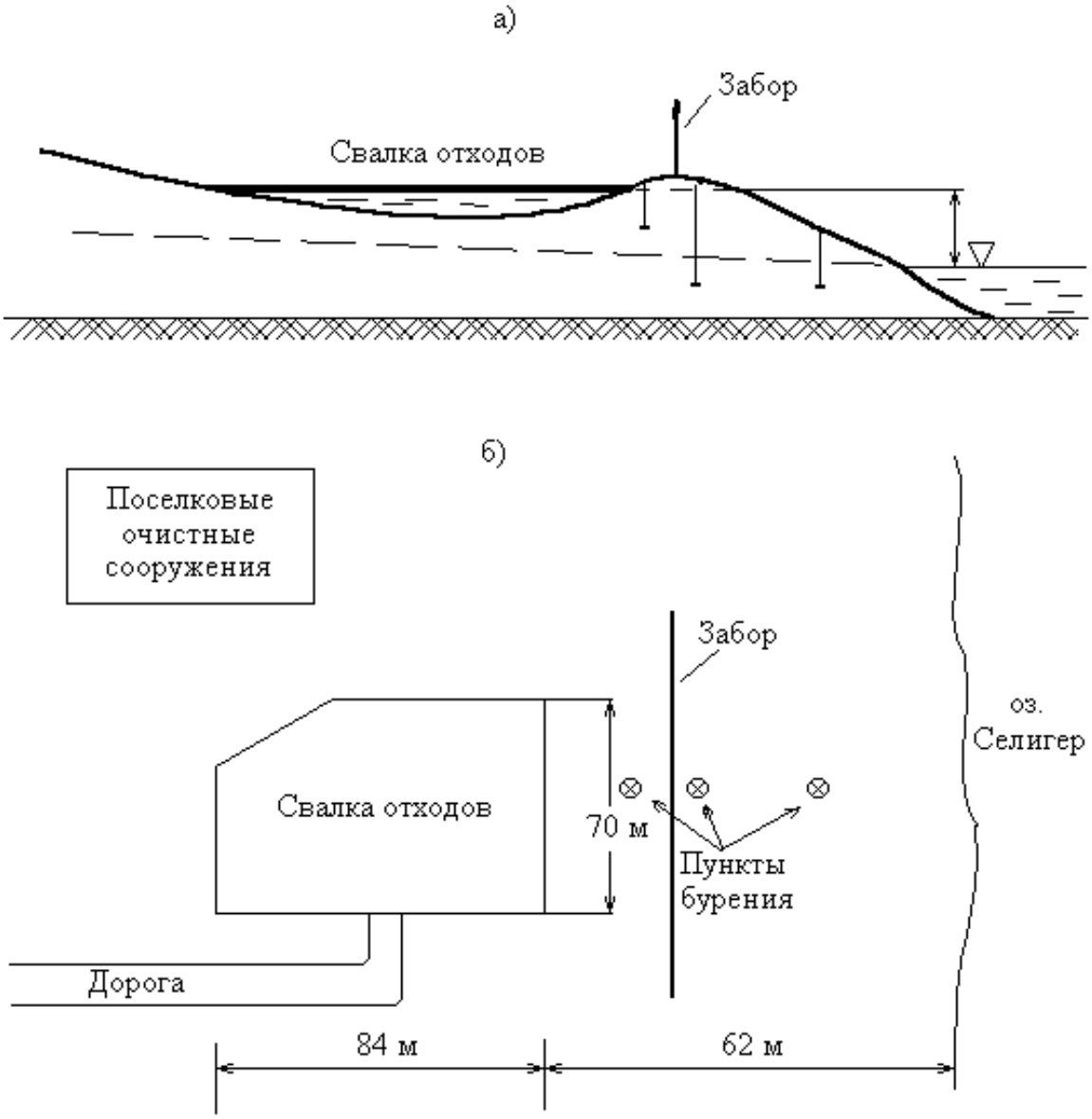



Рисунок 2.5 – Схема расположения пунктов бурения скважин и отбора монолитов: а) план; б) разрез

Концентрация хлоридов определялись методом титрования нитратом серебра [129–131].

Анализ на сульфаты проводился с помощью спектрофотометрического определения, основанного на реакции сульфат иона в кислой среде с хлоридом бария. Степень мутности раствора определялась на спектрофотометре [128–131].

Содержание калия в пробах воды определялось с помощью пламенно-фотометрического метода с построением калибровочной кривой на основании измерений со стандартными растворами [129–131].

Для проведения лабораторных экспериментов по определению фильтрационных и гидрохимических параметров были отобраны монолиты почвогрунта ненарушенной структуры. Образцы грунта отбирались с помощью бур-проботборника в металлические грунтоприемные цилиндры высотой 5 и 10 см [27, 132, 133].

Результаты химических анализов проб грунтовых вод, проведенных в лаборатории кафедры "Горное дело, природообустройство и промышленная экология" ТвГТУ, приведены в таблицах 2.1 – 2.8, в которых представлены результаты химических анализов грунтовых вод не только на пути фильтрационного потока от свалки к озеру, но и в озере Селигер.

На основании анализа результатов исследований в качестве основных загрязняющих веществ были выбраны аммонийный азот и нитратный азот. Кроме того, поскольку поселковые очистные сооружения являются двухступенчатыми и в сбрасываемых в озеро стоках концентрации $NH_4^+$ тоже в несколько раз превышают ПДК (0,5 мг/л). Дополнительное поступление иона аммония с грунтовыми водами от полигона может способствовать бурному развитию фитопланктона в летний период и так называемому "цветению" озера. В зимний период поступление аммония также нежелательно, т.к. оно будет вредно действовать на гидробионты и ихтиофауну [123, 124].

### 2.2.1. Определение активной пористости, параметра гидродисперсии параметров сорбции

Для расчета этих параметров в гидроэкологической лаборатории ТвГТУ была проведена серия экспериментов по промывке отобранных на объекте исследования монолитов грунта раствором хлористого калия.

Таблица 2.1 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 1998 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 5 | – | 31,91 | 25 | 15 |
| На условно фоновой территории | 14,51 | 0,5 | 3,55 | 160 | 7 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 10,99 | 1,3 | 24,82 | 29 | 44,5 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 16,65 | 0,7 | 7,10 | 2,5 | 25 |
| $ПДК_{р\text{-}х}$ | 0,5 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Таблица 2.2 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 2000 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 14 | 0,37 | 56,7 | 18,1 | 15,7 |
| На условно фоновой территории | 5,4 | 0,25 | 74,5 | 114 | 5,0 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 1,2 | 0,096 | 24,8 | 12,2 | 8,2 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 16,0 | 0,22 | 60,3 | 18,3 | 17,5 |
| ПДКр-х | 0,5 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Таблица 2.3 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 2002 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 1,51 | 0,42 | 50,4 | 4,1 | 11,7 |
| На условно фоновой территории | 3,8 | 0,39 | 73,4 | 51,2 | 4,7 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 1,9 | 0,1 | 54,8 | 15,2 | 8,5 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 25,0 | 0,43 | 62,1 | 19,3 | 17,4 |
| ПДКр-х | 0,5 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Таблица 2.4 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 2004 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 6 | 0,28 | 52,3 | 5,1 | 14,2 |
| На условно фоновой территории | 2,1 | 0,27 | 65,8 | 36,9 | 5,3 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 2,4 | 0,15 | 22,9 | 10,5 | 5,4 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 25,2 | 0,27 | 62,1 | 20,4 | 12,9 |
| ПДКр-х | 0,5 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Таблица 2.5 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 2006 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 4,1 | 0,22 | 49,5 | 5,5 | 8,6 |
| На условно фоновой территории | 1,9 | 0,15 | 65,5 | 26,4 | 6,1 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 2,2 | 0,13 | 46,7 | 29,4 | 9,2 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 31,2 | 0,29 | 69,1 | 30,2 | 18,9 |
| ПДКр-х | 0,39 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Таблица 2.6 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 2008 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 1,5 | 0,25 | 47,8 | 17,1 | 10,3 |
| На условно фоновой территории | 2,6 | 0,14 | 56,5 | 25,6 | 5,1 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 2,1 | 0,18 | 43,6 | 22,1 | 7,2 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 33,3 | 0,26 | 65,3 | 18,8 | 16,6 |
| ПДКр-х | 0,39 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Таблица 2.7 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 2012 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 1,4 | 0,11 | 55,7 | 18,5 | 6,3 |
| На условно фоновой территории | 2,8 | 0,15 | 58,5 | 28,3 | 7,4 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 3,5 | 0,16 | 41,6 | 25,1 | 8,3 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 44,1 | 0,22 | 62,2 | 20,8 | 17,5 |
| ПДКр-х | 0,5 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Таблица 2.8 – Результаты анализа сорбируемых и несорбируемых ингредиентов в поверхностных и грунтовых водах за 2016 г.

| Место отбора проб | Концентрация ингредиентов, мг/л | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Азот аммонийный ($N\text{-}NH_4^+$) | Азот нитратный ($N\text{-}NO_3^-$) | Хлориды ($Cl^-$) | Сульфаты ($SO_4^{2-}$) | Калий ($K^+$) |
| В озере Селигер (вблизи свалки) | 1,6 | 0,45 | 48,5 | 17,1 | 9,4 |
| На условно фоновой территории | 2,7 | 0,17 | 58,7 | 25,6 | 6,1 |
| В 10 м от озера (50 м от свалки) | 2,9 | 0,19 | 44,2 | 22,1 | 7,5 |
| На территории свалки участка размещения отходов | 33,1 | 0,28 | 67,2 | 28,2 | 19,6 |
| ПДКр-х | 0,5 | 9 | 300 | 100 | 50,0 |

Эксперименты выполнялись на установке конструкции ТГТУ [132, 134], схематично изображенной на рисунке 2.6.

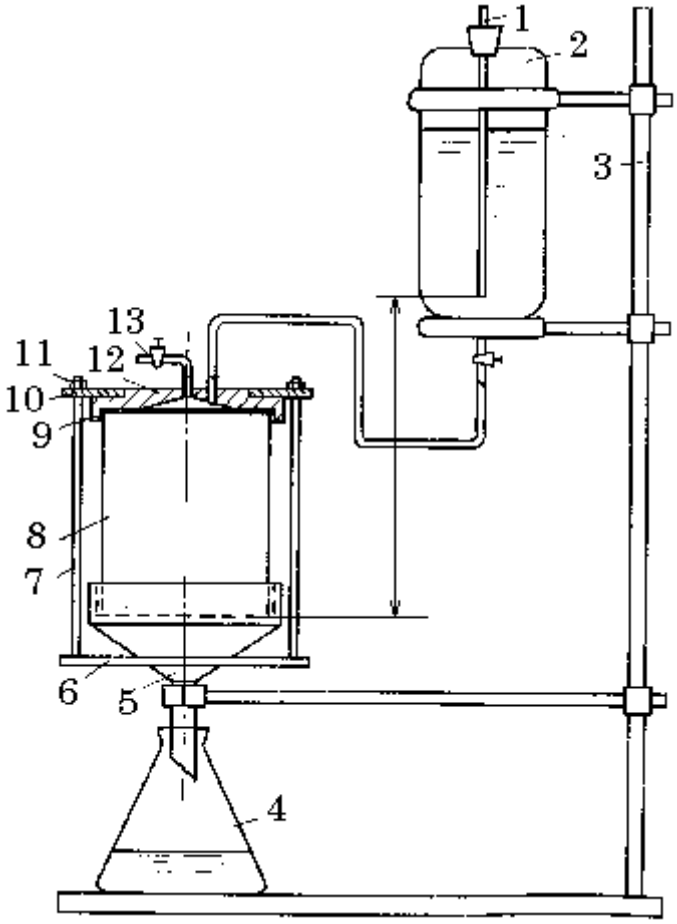



Рисунок 2.6 – Схема установки для снятия выходных кривых на монолитах почвогрунтов

1 – воздуховпускная трубка; 2 – сосуд типа Мариотта; 3 – штатив; 4 – приемная колба для сбора порций фильтрата; 5 – воронка Бюхнера; 6 – цилиндр с монолитом грунта; 7 – кольцевой выступ; 8 – крепежное кольцо; 9 – шпильки; 10 – верхнее крепежное кольцо; 11 – гайки; 12 – крышка; 13 – уплотнительное кольцо; 14 – фильтр

Фильтрационная установка включает в себя цилиндрический корпус с расположенным в нем монолитом грунта, крышки, сосуда типа Мариотта. Все элементы конструкции крепятся на штативе, что придает ей компактность. Для сбора порций фильтрата, под цилиндром, опирающимся на дно воронки Бюхнера, располагается приемная колба.

Порядок выполнения эксперимента по снятию выходных кривых следующий. С цилиндра снимаются крышки, а затем на его верхнее основание накладывалась крышка 12 с уплотненным кольцом 13 и фильтром 14, а на крышку – верхнее крепежное кольцо 10. Затем на цилиндр 6, имеющий кольцевой выступ 7, надевается снизу крепежное кольцо 8 со шпильками 9, которые входят в отверстия верхнего крепежного кольца, и гайками 11 крышка герметично прижимается к цилиндру [132, 134].

Затем цилиндр переворачивается на $180^0$ и крышкой вниз устанавливается на кольцо с прорезью штатива. Емкость 2 закрепляется в таком положении, чтобы нижний срез воздуховпускной трубки 1 был на уровне с верхом перевернутого образца. При открытом кране емкости с водой 2 образец переводится в двухфазное состояние, т.е. из грунта вытесняется воздух. Затем монолит грунта выдерживался в течение определенного времени в закрытом состоянии для выравнивания концентрации по высоте монолита или установления равновесного состояния [132, 134]. После окончания подпитки водой, цилиндр снимался с кольца штатива и устанавливается на воронку Бюхнера, и затем осуществлялась подача через монолит загрязняющего раствора (KCL). При фильтрации раствора KCL фильтрат собирался порциями в пронумерованные колбы. После пропускания через колонку 7 – 10 ее поровых объемов, отбор порций фильтрата завершался и в пробах определись концентрации калия и хлора (таблица 2.9).

По результатам каждого эксперимента строились две выходные кривые - для хлор-ионов и иона калия, которые в дальнейшем непосредственно использовались для расчета гидрохимических параметров [132].

Высота слоя фильтрата рассчитывалась путем деления кумулятивного объема фильтрата на площадь поперечного сечения колонки ($S = 50,24$ см$^2$) грунта.

Таблица 2.9 – Результаты определения параметров миграции ингредиентов

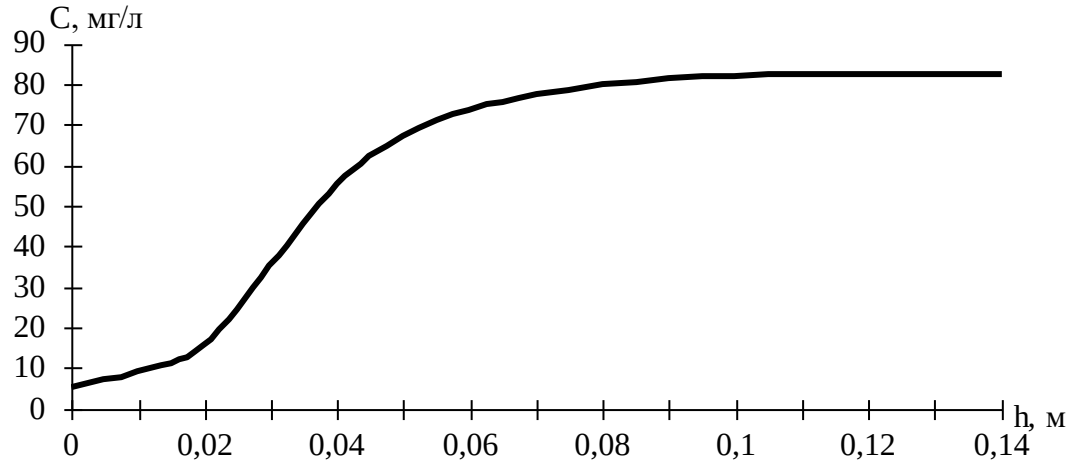
| № пробы | Объем фильтрата W, см$^3$ | Кумулятивн. объем фильтрата ΣW, см$^3$ | Высота слоя фильтрата h, м | Концентрац. калия ($K^+$), мг/л | Концентрац. хлора ($Cl^-$), мг/л |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 34 | 34 | 0,007 | 1 | 8,86 |
| 2 | 40 | 74 | 0,015 | 1 | 19,49 |
| 3 | 58 | 132 | 0,026 | 1 | 21,27 |
| 4 | 70 | 202 | 0,040 | 4,25 | 25,8 |
| 5 | 71 | 273 | 0,054 | 12 | 33,2 |
| 6 | 44 | 317 | 0,063 | 16,25 | – |
| 7 | 108 | 425 | 0,085 | 20 | 44,3 |
| 8 | 68 | 493 | 0,098 | 22 | 44,3 |
| 9 | 107 | 600 | 0,119 | 27,75 | 53,4 |
| 10 | 54 | 654 | 0.13 | 28,5 | 53,4 |
| 11 | 97 | 751 | 0,15 | 29,5 | 53,4 |
| 12 | 117 | 868 | 0,17 | 30,1 | 53.4 |
| 13 | 47 | 915 | 0,18 | 30,8 | 53.4 |
| 14 (исх.) | – | - | - | 38,8 | 53,4 |

Выходные кривые строились в координатах C-h. Вид выходных кривых для ионов $Cl^-$ и $K^+$ показан на рисунке 2.7. Затем кривая разбивалась на четное число интервалов N и с графика снимались значения концентрации ингредиента ($C^-$ или $K^+$) на границах интервалов, используемые далее при расчетах.

Анализ выходных кривых был выполнен с помощью алгоритмов, разработанных в ТвГТУ [133]. По выходной кривой хлор-ионов ($Cl^-$) определялись значения активной пористости $n_a$ и параметра гидродисперсии $\lambda$, для чего была разработана компьютерная программа OWR-26.

По выходной кривой $K^+$ (сорбируемый ингредиент) с помощью разработанного программного продукта ALPHA определялись значения коэффициента скорости сорбционного обмена $\beta$ и коэффициента распределения иона $\alpha$.

а)




б)

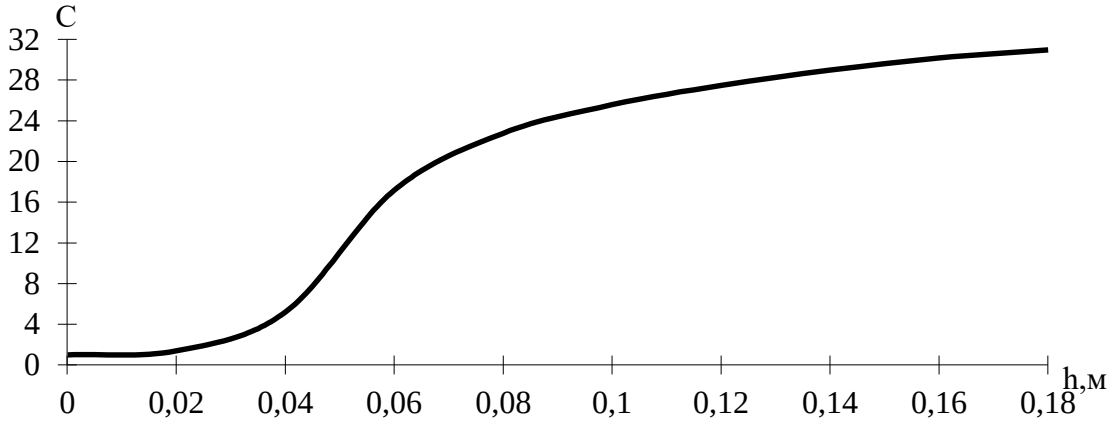



Рисунок 2.7 – Выходные кривые, полученные при промывке одного из монолитов грунта раствором KCl: а) для несорбируемого иона $Cl^-$; б) для сорбируемого иона $K^+$; $C_0$ – исходная концентрация иона в поровом растворе монолита перед промывкой; $C_n$ – концентрация иона в промывной воде.

Осредненные значения гидрохимических параметров, полученные после обработки экспериментальных данных, представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты расчетов гидрохимических параметров переноса несорбирующихся и сорбирующихся ингредиентов

| $n_a$ | $\lambda$, м | $\beta$, $м^{-1}$ | $\alpha$ |
|---|---|---|---|
| 0,586 | 0,645 | 72,6 | 0,826 |

Методика определения гидрохимических параметров и компьютерные программы OWR-26 и ALPHA разработаны в ТвГТУ [132 – 134].

### 2.2.2. Определение средней скорости фильтрации

Средняя скорость фильтрации грунтовых вод к оз. Селигер была принята из балансового соотношения. Так как фильтрат образуется в основном при выпадении жидких атмосферных осадков, то из общего количества осадков за год была извлечена сумма осадков за ноябрь – март (150 мм). В результате получился слой воды в 0,52 м. Таким образом, среднемноголетняя скорость движения грунтового потока со свалки в озеро составит 0,52/365=0,0014 м/сут.

### 2.2.3. Коэффициенты трансформации и молекулярной диффузии

Коэффициент скорости трансформации нитритов $k_1$ был принят на основе информационных источников [135] Выполненный автором [135] анализ экспериментальных данных по динамике нитрификации и денитрификации в почвогрунтах позволил установить зависимость этих процессов от температуры (t), влажности (W) и реакции среды (pH).

Коэффициент скорости трансформации нитритов $k_1$ для конкретных значений t, W и pH определяется из выражения (2.1)

$$k_1 = k_{10} \cdot f_1(t, W, pH), \tag{2.1}$$

где $k_1$ – значение $k_{10}$ при оптимальных условиях.

Значение $k_{10}$ было принято 0,005 сут$^{-1}$. Эта величина входит в диапазон для сероземов, а эти почвы из приведенных автором работы [135] наиболее близки к почвам поселка Солнечный по физико-химическим свойствам, например, по емкости катионного обмена.

Значение $f_1$ было найдено графическим способом, так как среднегодовая температура грунтовых вод составляет $5^0$С. При этом, значение влажности было принято равным предельно-полевой влагоемкости, а реакция среды нейтральной. Как следует из графика (рисунок 2.8) $f_1$ = 0,02. Поэтому $k_{10}$ = 0,005·0,02 = 0,0001 сут$^{-1}$.

Значение коэффициента $k_2$, учитывающего процессы, приводящие к снижению концентрации иона $NH_4^+$ в поровом растворе за счет транспирации корнями растений при расчетах было принято равным $k_{1,}$, т.е. $k_2$ = $k_1$ = 0,0001 сут $^{-1}$.

Молекулярная диффузия различных веществ в растворах в свободной среде характеризуется коэффициентом $D_м = 86 \cdot 10^{-5}$ м$^2$/сут.

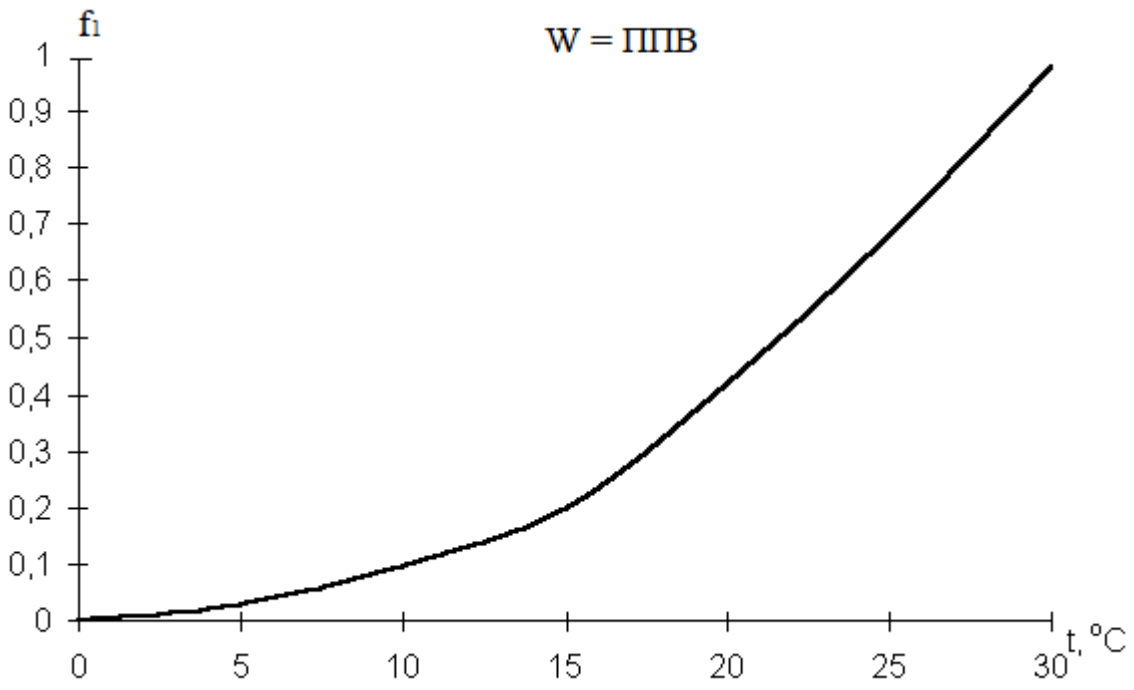



Рисунок 2.8 – График зависимости $f_1$ (W, pH) от температуры

Коэффициент молекулярной диффузии для кварцевого песка равняется 2,6 – $6 \cdot 10^{-5}$ м$^2$/сут, для моренных суглинков установлен $D_м$ = 0,4 – $0{,}9 \cdot 10^{-5}$ м$^2$/сут [78]. Поэтому при расчетах миграции загрязняющих веществ со свалки коэффициент молекулярной диффузии был принят $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ м$^2$/сут.

### 2.2.4. Исходное загрязнение и концентрации загрязняющих веществ в источнике загрязнения

Грунтовые воды в населенных пунктах характеризуются высоким содержанием аммонийного азота [136]. Это подтверждено и нашими исследованиями на окраинах г. Твери в водоохранных зонах рек, где средняя концентрация аммонийного азота составила 3,1 мг/дм$^3$.

Невысокая концентрация аммонийного азота в грунтовых водах в ближайших к поселку Солнечный населенных пунктах (д. Пачково и д. Твердякино), объясняется отбором этих вод из питьевых колодцев. В колодцах грунтовые воды контактируют с воздухом и аммонийный азот может трансформироваться в нитриты и нитраты под действием аэробных микроорганизмов $NH_4$:$NO_2$:$NO_3$. Поэтому в качестве исходной расчетной концентрации аммонийного азота было принято значение 1,3 мг/л, как среднее значение между концентрациями N-$NH_4$ в грунтовых водах в д. Пачково, д. Твердякино и на окраинах Твери в водоохранных зонах. Исходная концентрация нитратного азота была принята равной 0,5 мг/л, т.е. как в грунтовых водах на условно фоновой территории в 500 м западнее пристани Северной.

Состав фильтратов 20 полигонов ТКО Московской и Ленинградской области, концентрации наиболее характерных ингредиентов приведены в таблице 2.11 [137, 138].

Среднегодовая концентрация аммонийного азота в фильтрате, образующемся на полигоне ТКО, была принята 64,0 мг/л, а нитратного азота 2,8 мг/л, что подтвердилось данными лабораторного эксперимента.

Таблица 2.11 – Состав фильтрата концентрация ингредиентов (мг/дм$^3$) по данным наблюдений на полигонах ТКО Московской и Ленинградской области [137, 138]

| Ингредиент | Интервал изменения концентрации | Среднее значение концентрации |
|---|---|---|
| Аммоний | 0,2 – 2500 | 360,9 |
| Кальций | 30,5 – 1805 | 280,1 |
| Магний | 40,1 – 316 | 113,9 |
| Na+K | 139,6 – 24528,6 | 3813,4 |
| Хлориды | 170,2 – 33420,7 | 4362,6 |
| Сульфаты | 10,7 – 3292,0 | 458,8 |
| Нитраты | н/о – 125,0 | 52,0 (из 11) |
| Гидрокарбонат | 305 – 18300 | 4450,3 |
| ПО | н/о – 768 | 172,1(из 12) |
| Сухой остаток | 1250 – 63244 | 12618 |
| pH | 5,6 – 8,9 | 7,35 |

Для сравнения следует сказать, что средние данные по этим формам минерального азота по данным наблюдений на полигонах Московской и Ленинградской области составляют 360,9 и 11,7 мгN/л (по нитратам 52,0 мг/л) соответственно.

## 2.3 Выводы по второй главе

1. Описаны методики анализа и средства измерения для исследования объекта размещения отходов.

2. Разработан эффективный алгоритм расчета количественных значений гидрохимических параметров, учитывающий особенности математической модели переноса веществ в почвогрунтовой толще, позволяющий значительно снизить вычислительные затраты, что имеет важное значение в чрезвычайных ситуациях.

3. В результате экспериментальных исследований определены значения гидрохимических параметров почвогрунта: активной пористости $n_a$ = 0,586, параметр гидродисперсии $\lambda$ = 0,645 м, коэффициента скорости сорбционного обмена $\beta$ =72,6 м$^{-1}$, коэффициента распределения иона $\alpha$ = 0,826.

4. Достоверность результатов обоснована применением утвержденных в нормативных документах методик, современных методов исследования, высокоточного оборудования, а также значительным объемом анализов и использованием статистических методов обработки данных.

# ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОБЪЕКТА ДЕПОНИРОВАНИЯ ОТХОДОВ В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ

Для прогноза распространения загрязнений на основе математического моделирования необходимо, прежде всего, выполнить схематизацию природных условий и математическое описание миграционных процессов.

Алгоритм решения задачи прогнозирования миграции загрязнений от объекта утилизации ТКО пос. Солнечный Тверской области может быть представлен в виде блок-схемы (рисунок 3.1).

Как уже отмечалось, анализ приведенных в п. 2.1 природных условий на объекте моделирования позволяет считать фильтрационный поток одномерным, направленным от свалки к озеру.

Основными факторами, определяющими эмиссионный поток выбранных ингредиентов (аммонийного и нитратного азота) является конвективно-диффузионный перенос в направлении фильтрационного потока.

Распространение мигрантов в направлениях, перпендикулярных скорости фильтрационного потока, определяемое механизмом молекулярной диффузии, происходит весьма медленно. Молекулярной диффузией в горизонтальном направлении можно пренебречь, так как за счет нее даже за достаточно большой промежуток времени только незначительно изменится ширина загрязненного потока грунтовых вод с соответствующим уменьшением концентрации ингредиентов по краям потока. Такое допущение при расчетах незначительно уменьшит ширину участка выклинивания загрязненного потока в озеро и не исказит расчетное валовое поступление загрязняющих веществ в водоем.

С другой стороны, диффузионным (также весьма медленным) распространением мигрантов вглубь почвогрунтовой толщи пренебрегать нельзя, так как этот процесс определяет мощность загрязненного потока

грунтовых вод. Недостаточно точный учет этого фактора может существенно исказить расчетное поступление загрязнений в озеро.

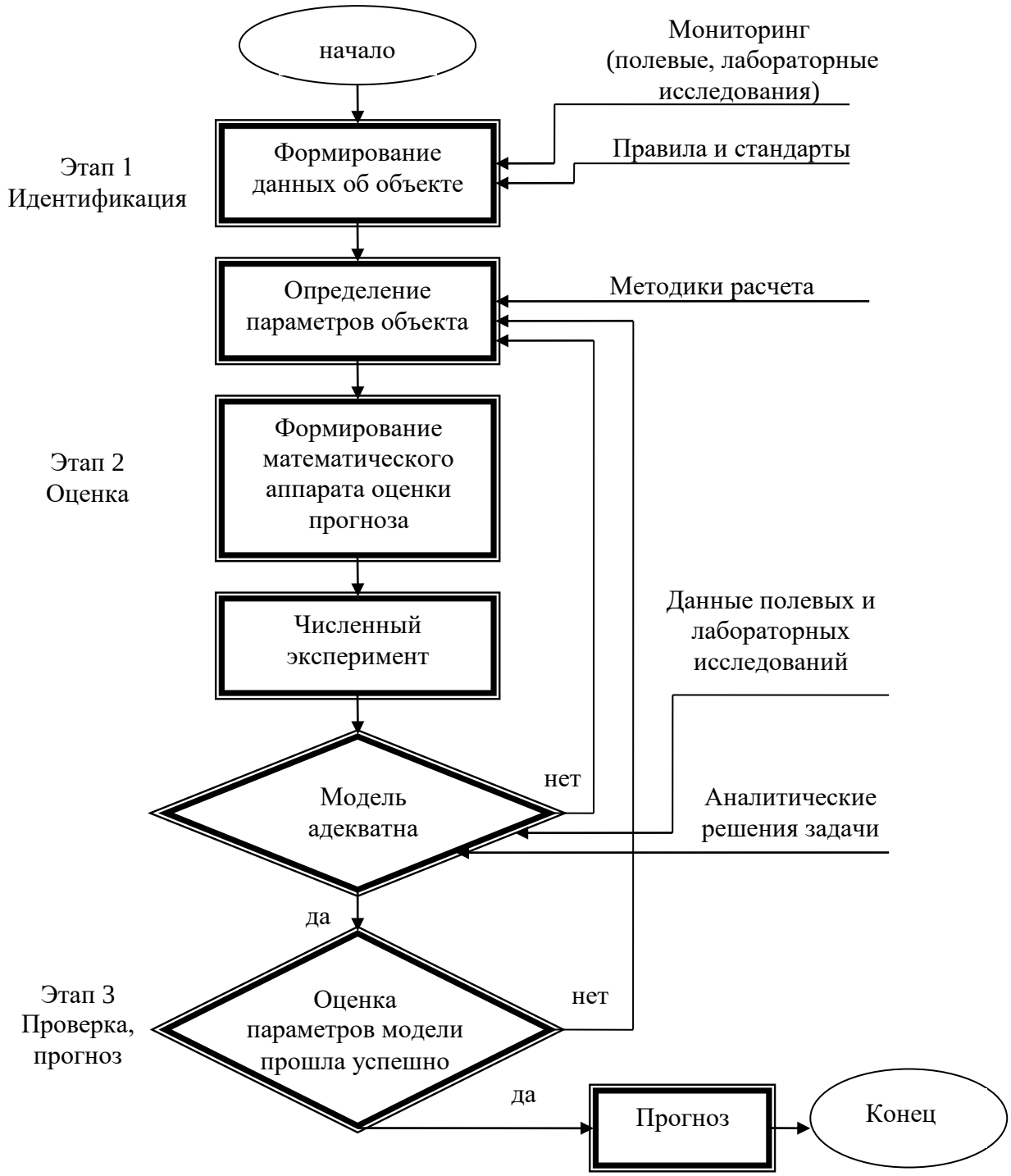



Рисунок 3.1 – Алгоритм прогнозирования миграции загрязнений от объекта утилизации ТКО

Молекулярная диффузия по вертикали учтена далее при математическом моделировании. Описанные выше факторы (и соответствующие допущения) в равной мере учитывались при математическом моделировании миграции обоих выделенных ингредиентов. Рассмотрим далее факторы, учитывающие индивидуальные свойства ионов $NO_3^-$ и $NH_4^+$.

Положительно заряженные ионы (к ним относится выделенный нами ион $NH_4^+$) активно участвуют во взаимодействии с почвенным поглощающим комплексом (ППК). С достаточной для практики точностью это взаимодействие может быть учтено при помощи уравнения кинетики обмена с линейной изотермой сорбции (типа Генри). В отличие от ионов $NH_4^+$ ионы $NO_3^-$ практически не сорбируются ППК, состоящим, главным образом, из отрицательно заряженных частиц коллоидной фракции почвогрунта.

Наряду с этим, как уже отмечалось, в анаэробных условиях имеют место процессы трансформации нитратной формы азота в аммонийную, которые также учтены при математическом моделировании.

В математическую модель включены члены ($k_1C_2$) и ($k_2C_1$), учитывающие процессы, снижающие количественные значения концентраций ионов в грунтовых водах (транспирация корнями растений, разбавление инфильтрационными водами и т.д.) [27, 124].

## 3.1. Математические модели миграции загрязнений объекта утилизации отходов

Для прогноза горизонтального переноса ингредиентов в направлении фильтрационного потока (рисунок 3.2) была использована система дифференциальных уравнений (3.1), которая дополнена параметрами, учитывающими процессы трансформации вещества, транспирации корнями растений, разбавления инфильтрационными водами.

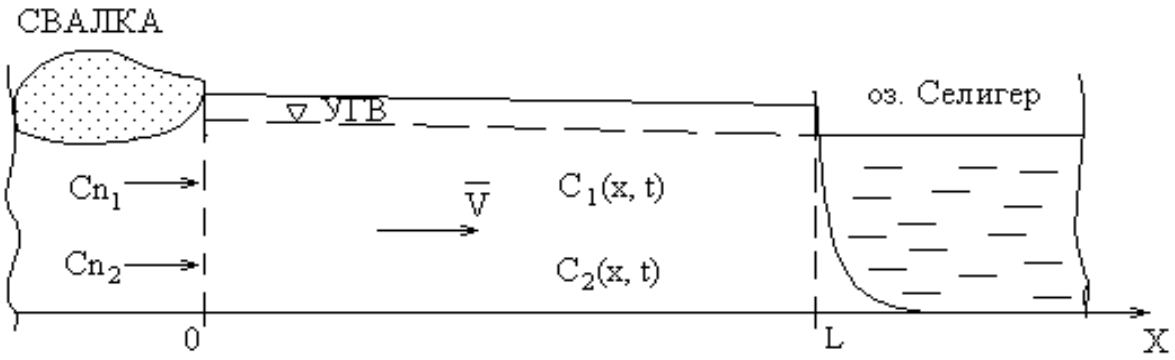



Рисунок 3.2 – Расчетная схема к описанию горизонтального распространения загрязняющих веществ в грунтовых водах: v – скорость фильтрации, м/сут; $C_1(x, t)$, $C_2(x, t)$ – концентрация ионов $NH_4^+$ и $NO_3^-$ в поровом растворе, соответственно, мг/л; $C_{n1}$, $C_{n2}$ – концентрация ионов $NH_4^+$ и $NO_3^-$ в поровом растворе, поступающем через сечение x = 0, мг/л; L – протяженность потока до озера, м.

$$\begin{cases} n_a \dfrac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \dfrac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - v\dfrac{\partial C_1}{\partial x} - \dfrac{\partial N_1}{\partial t} + k_1 C_2 - k_2 C_1, \\ \dfrac{\partial N_1}{\partial t} = -\beta(\alpha N_1 - n_a C_1), \\ n_a \dfrac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \dfrac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} - v\dfrac{\partial C_2}{\partial x} - k_1 C_2 . \end{cases} \qquad (3.1)$$

Здесь введены следующие обозначения: $C_1(x, t)$ – концентрация ионов $NH_4^+$ поровом растворе, мг/л; $C_2(x, t)$ – концентрация ионов $NO_3^-$ в поровом растворе, мг/л; $N_1(x, t)$ – количество ионов $NH_4^+$, сорбированное твердой фазой почвогрунта, г/м$^3$; x – горизонтальная координата, м; $D_1 = D_{м1} + \lambda_1|v|$ – коэффициент конвективной диффузии ионов $NH_4^+$, м$^2$/сут; $D_2 = D_{м2} + \lambda_2|v|$ – коэффициент конвективной диффузии ионов $NO_3^-$, м$^2$/сут; $D_{м1}$, $D_{м2}$ – коэффициенты молекулярной диффузии соответствующих ионов, м$^2$/сут; $\lambda_1$, $\lambda_2$ – параметры гидродисперсии, м; v – скорость фильтрации, м/сут; $n_a$ – активная пористость грунта; β – коэффициент скорости сорбционного обмена, сут$^{-1}$; α – коэффициент распределения; $k_1$ – коэффициент скорости трансформации, сут$^{-1}$ $k_2$ – эмпирический коэффициент, учитывающий процессы, приводящие к снижению концентрации иона $NH_4^+$ в поровом

растворе за счет транспирации корнями растений, разбавления инфильтрационными водами, сут$^{-1}$; t – время, сут [27, 124].

Распространение загрязняющих веществ по вертикали (рисунок 20) вглубь почвогрунтовой толщи описывается системой уравнений (10):

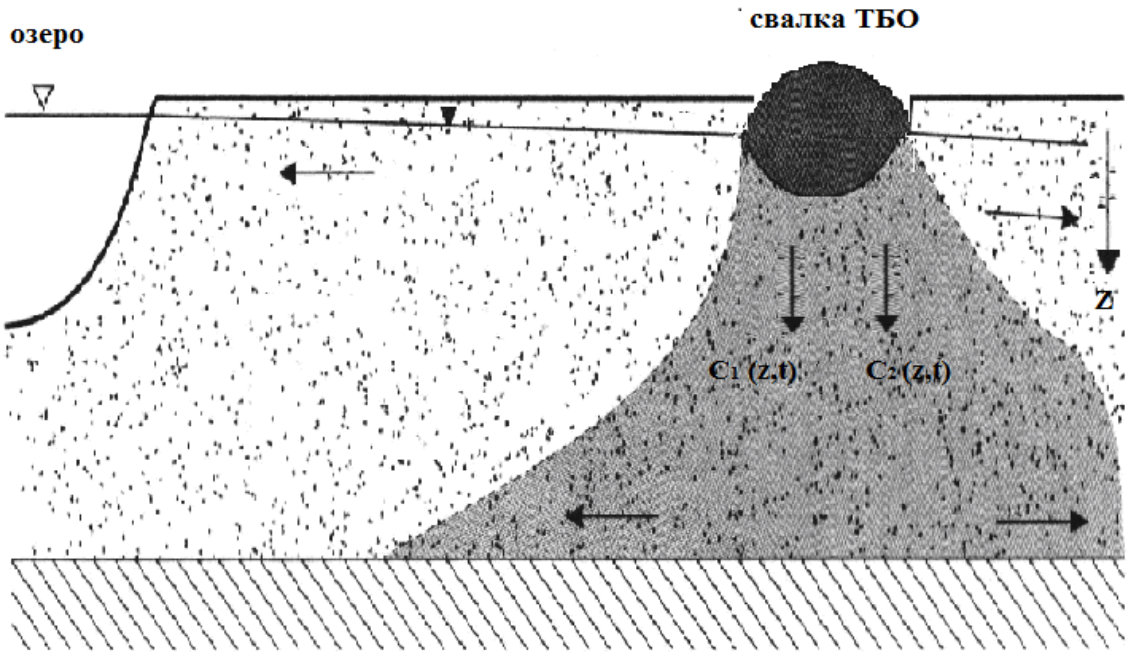



Рисунок 3.3 – Расчетная схема к описанию вертикальной миграции загрязняющих веществ в грунтовых водах: $C_1(z, t)$, $C_2(z, t)$ – концентрация ионов $NH_4^+$ и $NO_3^-$, соответственно, мг/л; z – вертикальная координата

$$\begin{cases} n_a \dfrac{\partial C_2}{\partial t} = D_{M1} \dfrac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} - \dfrac{\partial N_1}{\partial t} + K_1 C_2 \\ \dfrac{\partial N_1}{\partial t} = -\beta(\alpha N_1 - n_a C_1) \\ n_a \dfrac{\partial C_2}{\partial t} = D_{M_2} \dfrac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} - K_1 C_2 \end{cases} \tag{3.2}$$

Здесь z – вертикальная координата, отсчитываемая от поверхности грунтовых вод и ориентированная вниз. Остальные обозначения имеют прежний смысл [27].

## 3.2. Постановка краевых задач

Для получения аналитического и численного решения по построенным математическим моделям (3.1) и (3.2) процессов распространения загрязнений определены начальные и граничные условия.

Начальные условия системы уравнений (9):

$$t = 0: C_1(x, 0) = C_{10}(x), C_2(x, 0) = C_{20}(x), N_1(x, 0) = C_{10}(x)\cdot na/\alpha, \quad (3.3)$$

где $C_{10}(x)$, $C_{20}(x)$ – начальные распределения концентрации ионов $NH_4^+$ и $NO_3^-$ в поровом растворе, мг/л.

Граничные условия системы уравнений (3.1): во входном сечении потока (x=0) задается условие третьего рода, выражающее материальный баланс вещества через сечение (x=0) с учетом конвективного переноса и дисперсии; на второй границе потока (x=L) задается условие второго рода, учитывающее отсутствие возврата загрязняющего вещества, где L – протяженность потока до озера:

$$t > 0 \begin{cases} x = 0 : [C_1(0,t) - C_{n1}] \cdot v = D_1[\partial C_1(0,t) / \partial x], \\ [C_2(0,t) - C_{n2}] \cdot v = D_2[\partial C_2(0,t) / \partial x], \\ x = L : \partial C_1(L,t) / \partial x = 0, \ \partial C_2(L,t) / \partial x = 0, \end{cases} \quad (3.4)$$

где $C_{n1}$, – концентрация ионов $NH_4^+$ поровом растворе, поступающем через сечение x = 0, мг/л; $C_{n2}$ – концентрация ионов $NO_3^-$ в поровом растворе, поступающем через сечение x = 0, мг/л.

При проведении расчетов за начальный момент времени (t = 0) принят момент начала функционирования свалки ТКО (1947 год). При этом для начального момента грунтовые воды считались незагрязненными. Начальные концентрации ионов $NH_4^+$ и $NO_3^-$ в поровом растворе были приняты равными фоновым концентрациям.

Начальные условия системы уравнений (3.2):

$$t = 0: C_1(z, 0) = C_{10}(z), C_2(z, 0) = C_{20}(z), N_1(z, 0) = C_{10}(z) \cdot n_a/\alpha, \quad (3.5)$$

Граничные условия системы уравнений (3.2): на верхней границе почвогрунтовой толщи (x = 0) задается условие первого рода, учитывающее зависимость концентрации вещества от времени; на нижней границе

принимается условие второго рода, поскольку покровная толща на глубине L подстилается хорошо проницаемым дренирующим пластом:

$$t>0\begin{cases} z=0: C_1(0,t)=C_{n_1};\ C_2(0,t)=C_{n_2}, \\ z=L: \partial C_1(L,t)/\partial z=0,\ \partial C_2(L,t)/\partial z=0. \end{cases} \quad (3.6)$$

Здесь z – вертикальная координата, отсчитываемая от поверхности грунтовых вод и ориентированная вниз; L – протяженность области фильтрации, м. Остальные обозначения имеют прежний смысл [27, 124].

Численное решение приведенных выше краевых задач осуществлялось методом конечных разностей с использованием консервативной конечно-разностной схемы [139]. Составлен соответствующий моделирующий компьютерный комплекс, позволяющий проводить расчет распространения загрязнений в грунтовых водах при конкретных значениях исходных данных.

Таким образом, при практическом использовании сформулированной математической модели для прогнозных расчетов на компьютерном комплексе по результатам полевых исследований на объекте моделирования, лабораторных экспериментов и литературным данным должны быть предварительно найдены следующие величины:

– исходная концентрация исследуемых ингредиентов в поровом растворе на момент начала моделирования процесса ($C_{10}$, $C_{20}$);

– концентрации исследуемых ингредиентов в поровом растворе, поступающем в грунт от источника загрязнения ($C_{n1}$, $C_{n2}$);

– активная пористость грунта $n_a$;

– коэффициенты молекулярной диффузии ($D_{м1}$, $D_{м2}$);

– параметры дисперсии ($\lambda_1$, $\lambda_2$);

– скорость фильтрации (V);

– коэффициент скорости сорбционного обмена ($\beta$);

– коэффициент распределения ($\alpha$);

– коэффициент скорости трансформации ($k_1$);

– эмпирический коэффициент ($k_2$) [123].

## 3.3. Аналитическое решение задачи миграции загрязнений объекта

Для точного решения задачи миграции (3.1) в условиях (3.3) – (3.4) используется интегральное преобразование Лапласа (3.7)

$$C(x,t)=\frac{1}{2}C_n\left(e^{z_1}erfc\varphi_1+e^{z_2}erfc\varphi_2\right)-\frac{1}{2}C_0e^{-\gamma'\cdot t}\left(e^{\frac{v'\cdot x}{D'}}erfc\varphi_3+erfc\varphi_4-2\right). \quad (3.7)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$z_{1,2}=\frac{v'\cdot x\left(1\pm\sqrt{1+\varepsilon}\right)}{2D'};\ \varphi_{1,2}=\frac{x\pm v'\cdot t\cdot\sqrt{1+\varepsilon}}{2\sqrt{D'\cdot t}};\ \varepsilon=\frac{4\gamma' D'}{(v')^2};\ \varphi_{3,4}=\frac{x\pm v'\cdot t}{2\sqrt{D'\cdot t}};$$

$$v'=\frac{v}{n_э};\ \gamma'=\frac{\gamma}{n_э};\ D'=\frac{D}{n_э};\ n_э=n_a\frac{1+\alpha}{\alpha};$$

$$erfc\eta=1-erf\eta;\ erf\eta=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\eta}e^{-u_2}du-\textit{интегралверо ятности, причем}\ erfc(-\eta)=2-erf\eta;$$

$erfc\eta-$ *табулированная функция*

Следует отметить, что выражение (3.7) при определенных условиях можно упростить. Так, при достаточно больших значениях времени t и координаты x ( $\frac{x\cdot v'}{D'}$ ) члены $e^{z_1}erfc\varphi_1$ и $e^{\frac{x\cdot v'}{D'}}erfc\varphi_3$ становятся весьма малыми и ими можно пренебречь. Кроме того, при малых значениях ε<<1 в выражении для $\varphi_2$ можно положить $(1+\varepsilon)^{0,5}\approx 1$, а в выражении для $z_2$, разлагая $1-(1+\varepsilon)^{0,5}$ в ряд Тейлора и удерживая первые два члена разложения, можно принять $1-(1+\varepsilon)^{0,5}\approx -0{,}5\varepsilon.$

В результате сделанных допущений решение задачи (3.1) при условиях (3.3) – (3.4) примет более простой вид:

$$\overline{C}(x,t)=\frac{C(x,t)-C_0}{C_п-C_0}=\frac{erfc\varphi_4}{2(C_п-C_0)}\left(C_п e^{\frac{-\gamma'\cdot x}{V'}}-C_0e^{-\gamma'\cdot t}\right)-\frac{C_0}{C_п}\left(1-e^{-\gamma'\cdot t}\right), \quad (3.8)$$

где $\overline{C}$ (x,t), C (x,t), $C_0$, $C_п$ – соответственно относительная концентрация, концентрация вещества в подвижном поровом пространстве (фильтрате), начальная (фоновая) и концентрация во входном растворе; γ – коэффициент

скорости поглощения вещества почвогрунтом, сут$^{-1}$; $n_э$ – эффективная пористость грунта, $n_a$ – активная пористость грунта [27, 57]

$$\varphi_4 = \frac{x - V^* t}{2\sqrt{D^* t}}; \quad v^* = \frac{v}{n_э}; \quad n_э = n_a \frac{1+\alpha}{\alpha}; \quad D^* = \frac{\lambda \cdot v}{n_a};$$

$erfc\eta = 1 - \eta; erfc\eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\eta} e^{-u2} du$ – интеграл вероятности, причем $erfc(-\eta) = 2 - erfc\eta; erfc(-\eta) = erfc(\eta); erfc\eta$ – табулированная функция [27, 77, 140].

В случае распространения консервативного сорбируемого вещества ($\gamma = 0$, $n_a \leq n_э$) в любом створе потока в момент времени t формула (3.7) примет вид: [27, 57]

$$\overline{C}(x,t) = \frac{C(x,t) - C_0}{C_n - C_0} = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{x - v't}{2\sqrt{D't}}\right) \tag{3.9}$$

При $n_a = n_э$ ($\alpha = \infty$) имеем случай несорбируемого мигранта.

Для неконсервативного вещества ($\gamma \neq 0$) и при равенстве нулю его фоновой концентрации в пласте ($C_0 = 0$) при решении (3.7) получим:

$$\overline{C}(x,t) = \frac{C(x,t)}{C_n} = \frac{1}{2} y^{\frac{-\gamma \cdot t}{v}} erfc\left(\frac{x - v't}{2\sqrt{D't}}\right) \tag{3.10}$$

Аналитическое решение задачи распространения загрязнений свалки ТБО было получено с использованием параметров миграции сорбируемых и несорбируемых ингредиентов, полученных рамках полевых и лабораторных исследований объекта [27].

## 3.4. Математическое описание распространения загрязняющих веществ в водоемах

Распространение вещества в поверхностных водных объектах под влиянием турбулентного перемешивания получило название турбулентной диффузии. В озерах и водохранилищах на миграцию загрязнений

наибольшее влияние оказывает ветровое волнение и разного рода внутренние течения. Процесс распространения загрязняющих веществ в водоемах имеет пространственный характер и для консервативного вещества описывается уравнением турбулентной диффузии, имеющим следующий вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_X \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_Y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_Z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V_X \frac{\partial C}{\partial x} - V_Y \frac{\partial C}{\partial y} - V_Z \frac{\partial C}{\partial z}, \qquad (3.11)$$

где C(x, y, z, t) – концентрация загрязняющего вещества; $V_x$, $V_y$, $V_z$ – проекции средней скорости турбулентного течения на соответствующие оси координат; $D_x$, $D_y$, $D_z$ – коэффициенты турбулентной диффузии;. x, y, z – оси координат соответственно по длине водного потока, вдоль потока в горизонтального сечения, например от одного берега к другому и в вертикальном сечении, например, по глубине.

Совместное решение гидродинамической и миграционной задачи, позволяющей определить компоненты скорости течения, и данного уравнения турбулентной диффузии весьма затруднительно даже при использовании численных методов и современных компьютерных программ. Для практических расчетов было использовано решение только миграционной задачи, при придельном упрощении водного потока, считая его на расчетном участке одномерным (вдоль оси x), установившимся и равномерным.

При сбросе сточных вод в водоем выделяют зону основного разбавления происходящее благодаря турбулентному перемешиванию в водном объекте, и зону начального разбавления, происходящее за счет примешивания расположенной вокруг воды турбулентным струйным потоком, сформировавшимся при вытекании сточных вод из оголовка выпуска. Вычисление основного и начального разбавления проводится с помощью кратности соответственно основного $n_{осн}$ и начального $n_н$ разбавления с применением в дальнейшим балансового метода [77, 141].

Определение разбавления химических веществ сточных вод, сбрасываемых в поверхностные воды, осуществляется основываясь на

решении уравнений гидродинамики принимая во внимание уравнение диффузии в турбулентном потоке и ветровые течения. Этот процесс расчета разбавления является весьма сложным, трудоемким и часто осуществляется с помощью специальных компьютерных комплексов.

Пользуясь методом конечных разностей и осуществляя расчеты для ряда натурных наблюдений за разбавлением сточных вод Осташковского кожевенного завода в озере Селигер, М. А. Руффель разработал методику приближенных расчетов, которые значительно снижают трудоемкость вычислений по исходным уравнениям диффузии в турбулентном потоке [77, 141].

Метод М.А. Руффеля предполагает определение кратности полного разбавления сточных вод n по результатам начального разбавления $n_н$, происходящего у выпуска сточных вод, и основного разбавления $n_{осн}$, которое продолжается на бесконечно большом расстоянии от выпуска по формуле (3.12)

$$n = n_н \cdot n_{осн}, \tag{3.12}$$

Начальное и основное разбавление рассчитывается с помощью зависимостей, различающихся эмпирическими коэффициентами для берегового выпуска, расположенного в верхней трети глубины озера или в его мелководной части и для глубинного выпуска, находящегося далеко от берега на расстоянии до 500 м.

Расчет начального разбавления при выпуске сточных вод в мелководье или в верхнюю треть глубины определяется по формуле (3.13)

$$n_{\text{Н}} = \frac{q + 0{,}00215 \cdot W \cdot H_{ср}^2}{q + 0{,}000215 \cdot W \cdot H_{ср}^2}, \tag{3.13}$$

где q – расход сточных вод, м$^3$/с; $H_{ср}$ – осредненная глубина озера около выпуска сточных вод, м (она определяется на участке протяженностью 50 м при средней глубине водоема Н = 3 – 4 м; на участке в 160 м при Н=5 – 6 м; на участке в 200 м – при Н = 7 – 8 м; на участке в 250 м – при Н = 9 – 10 м);

W – средняя скорость ветра, соответствующая наиболее неблагоприятному в экологическом отношении направлению ветра, м/с (в первом случае – вдоль берега, во втором – от берега).

Основное разбавление для первого случая рассчитывается по формуле (3.14)

$$n_{осн} = 1 + 0{,}412\left(\frac{L}{\delta X}\right)^{0{,}627+0{,}0002\left(\frac{L}{\delta X}\right)}, \qquad (3.14)$$

где L – расстояние от места выпуска до расчетного створа, м; δX – расстояние между расчетными сечениями, м.

$$\delta X = 6{,}53 \cdot H_{ср}^{1{,}167} \qquad (3.15)$$

При выпуске сточных вод в нижнюю треть глубины кратности начального и основного разбавления определяются по эмпирическим формулам (3.16) – (3.18).

$$n_H = \frac{q + 0{,}000158 \cdot W \cdot H_{ср}^2}{q + 0{,}000079 \cdot W \cdot H_{ср}^2}, \qquad (3.16)$$

$$n_{осн} = 1{,}86 + 2{,}32\left(\frac{L}{\delta X}\right)^{0{,}41+0{,}0064\left(\frac{L}{\delta X}\right)}, \qquad (3.17)$$

при чем

$$\delta X = 4{,}41 \cdot H^{1{,}167}. \qquad (3.18)$$

Приведенные выше эмпирические формулы М.А. Руффеля могут быть использованы лишь в тех границах, для которых они получены. Так, в случае распространения загрязненной струи вдоль берега они применимы для расстояний до 20 км от выпуска до контрольного створа. При выпуске сточных вод в нижнюю треть глубины и при направлении движения сточных вод к берегу (при направлении ветра перпендикулярно берегу) формулы применимы для выпусков, отнесенных от берега вглубь водоема на расстоянии до 500 м.

Определение концентрации загрязняющего вещества в контрольном (расчетном) створе у ближайшего пункта водопользования $C_{п.вод.}$ при известной кратности разбавления n проводится по формуле (3.19)

$$C_{п.вод} = \frac{C_{оч}}{n} + C_{в}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \qquad (3.19)$$

где $C_{оч}$ – концентрация вещества в очищенных стоках (или неочищенных, т.е. просачивающихся с подземными водами), поступающих в водный объект, мг/л; $C_{в}$ – концентрация вещества в озере, мг/л.

В результате для прогнозных расчетов миграции химических веществ в водном объекте требуется информация о расходе загрязненных вод q, поступающих в озеро, содержании ингредиентов в загрязненных водах $C_{оч}$ и в озере $C_{в}$, среднюю глубину водоема в месте поступления в него загрязненных вод $H_{ср}$.

## 3.5. Экспериментальные исследования по прогнозу распространения загрязнений в грунтовые и поверхностные воды от объекта депонирования отходов

### 3.5.1. Расчет распространения загрязняющих веществ в подземных водах

Прогноз распространения токсичных ингредиентов (ионов $NH_4^+$ и $NO^-_3$) в подземных водах осуществлялся с помощью описанных выше математических моделей (3.1) – (3.2) и (3.3) – (3.6). Численное решение дифференциальных уравнений осуществлялось методом конечных разностей [139, 140]. В ходе исследований был разработан алгоритм численного решения данных краевых задач с использованием консервативной разностной схемы повышенной точности. Для проведения конкретных вариантов расчетов в соответствии с разработанным алгоритмом составлен моделирующий компьютерный комплекс.

При проведении расчетов за начальный момент времени (t = 0) принят момент начала функционирования свалки ТБО (1947 год). При этом для начального момента грунтовые воды считались незагрязненными. Начальные концентрации ионов $NH_4^+$ и $NO^-_3$ в поровом растворе были приняты равными фоновым концентрациям ($C_0$ ($N\text{-}NH_4^+$) = 1,3 мг/л, $C_0(NO_3^-)$ = 0,5 мг/л). Остальные исходные данные приведены в п. 2.2.1 – 2.2.4.

Расчеты осуществлялись по следующей схеме. Вначале с использованием математической модели (3.2) было рассчитано распространение загрязняющих веществ по вертикали вглубь почвогрунтовой толщи. По результатам проведенных расчетов для любого момента времени t можно построить эпюру распределения концентрации по глубине для каждого из двух рассматриваемых ионов (рисунок 3.4 а). В работе вычислялась для момента времени t приведенная глубина распространения ингредиента по формуле (3.20)

$$h(t) = \frac{l(t)}{C(0,t) - C_0}\left[C(z,t) - C_0\right]dz\,, \qquad (3.20)$$

где $C_0$ – начальная (фоновая) концентрация иона; C (0, t) – концентрация иона на поверхности почвы (z=0) в момент t; l(t) – максимальная глубина распространения ингредиента по вертикали в момент t.

Глубина h(t) соответствует мощности загрязненного слоя, если всю массу распространившегося вглубь почвы загрязняющего вещества собрать в "пакет" с постоянной концентрацией, равной концентрации на поверхности почвы (рисунок 3.4 б).

После расчета распространения загрязняющих веществ вглубь почвогрунтовой толщи на период длительностью 100 лет для ионов $NH_4^+$ и $NO_3^-$ с использованием формулы (3.2) построены графики, выражающие зависимость приведенной глубины h от времени. Эти графики показаны на рисунке 3.5. Различие в графиках вызвано тем, что в процессе миграции ион $NH_4^+$ частично удерживается ППК, а ион $NO_3^-$ не сорбируется почвой.

Расчет горизонтальной миграции ингредиентов осуществлялся с помощью математической модели (3.1), (3.3) – (3.4). При этом считалось, что рассчитанная по данной модели концентрация иона в сечении X распространяется по вертикали на глубину h(t), определяемую графиками на рисунке 3.4, где время t отсчитывается с момента прохождения фронтом распространения загрязняющего вещества данного сечения фильтрационного потока.

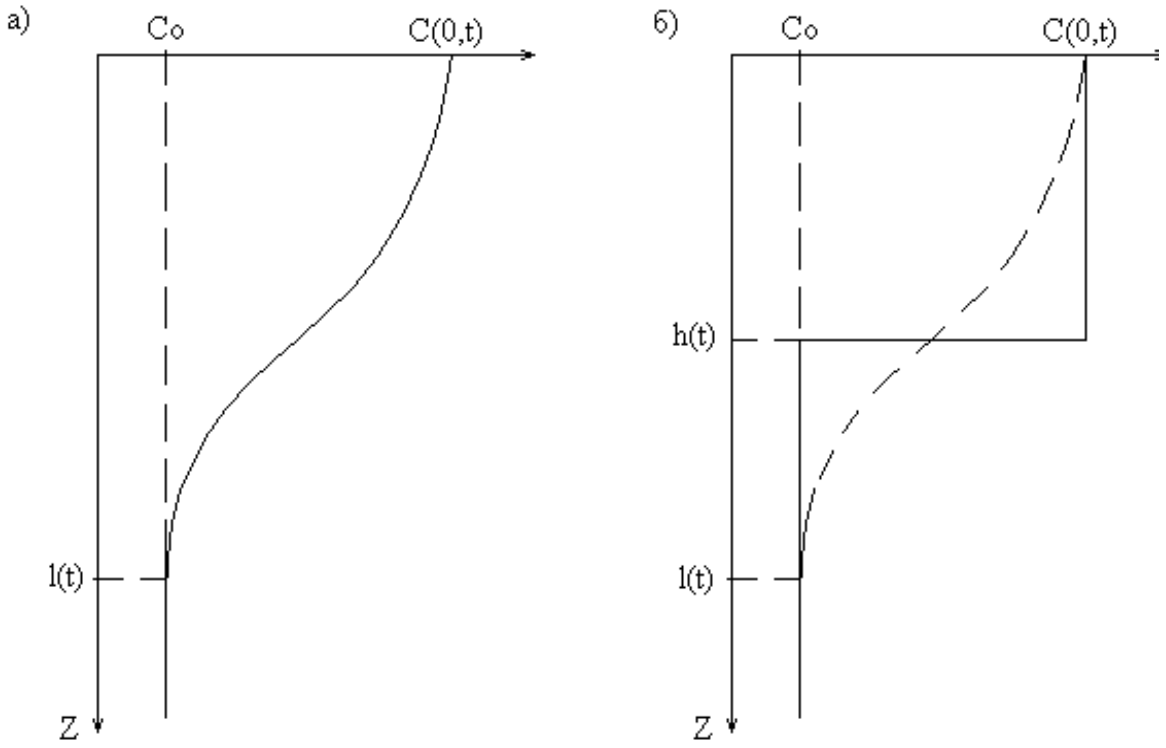



Рисунок 3.4 – а) реальная эпюра распределения концентрации по глубине; б) приведенная эпюра, собранная в "пакет"

Расчет горизонтальной миграции ингредиентов осуществлялся с помощью математической модели (3.1), (3.3) – (3.4). При этом считалось, что рассчитанная по данной модели концентрация иона в сечении x распространяется по вертикали на глубину h(t), определяемую графиками на рисунке 3.4, где время t отсчитывается с момента прохождения фронтом распространения загрязняющего вещества данного сечения фильтрационного потока.

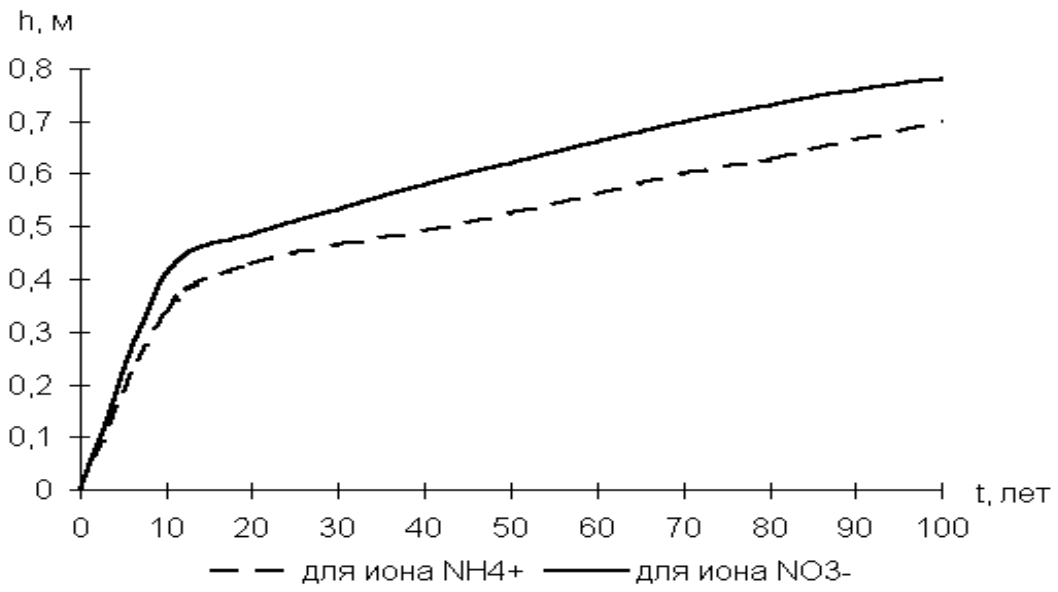



Рисунок 3.5 – Зависимость приведенной глубины распространения ингредиента от времени

В связи с тем, что полученные при расчетах концентрации иона $NO_3^-$ на всем протяжении фильтрационного потока значительно меньше ПДК, в дальнейшем анализируются результаты прогнозных расчетов только для иона $NH_4^+$ [124].

Моделирование миграции аммонийного азота позволило, установить динамику распределения ингредиентов в почвогрунтовой толще исследуемого объекта в зависимости от времени существования свалки (50 лет, 75 лет, 100 лет). На рисунках 3.6 – 3.8 представлены результаты расчета горизонтальной миграции ионов $NH_4^+$.

В результате анализа данных прогнозных расчетов на период времени 50 лет, установлено, что на кривых, характеризующих миграцию аммонийного азота в почвогрунтовой толще (рисунок 3.6), полученных и для численного, и для аналитического решения можно выделить три зоны: зона с максимальным загрязнением подземных вод, где содержание аммонийного азота приближается к его концентрации в фильтрате (64 мг/л); переходная зона, где происходит смешение загрязненных вод с чистыми грунтовыми

водами; зона с наименьшим загрязнением подземных вод, где содержание ингредиента близко к его фоновым значениям в подземных водах (1,3 мг/л).

Следует отметить, что численный эксперимент показал, что фронт загрязнения грунтовых вод с максимальной концентрацией распространяется на расстоянии примерно 20 м от полигона ТКО, тогда как при аналитическом решении это расстояние составляет порядка 30 м.

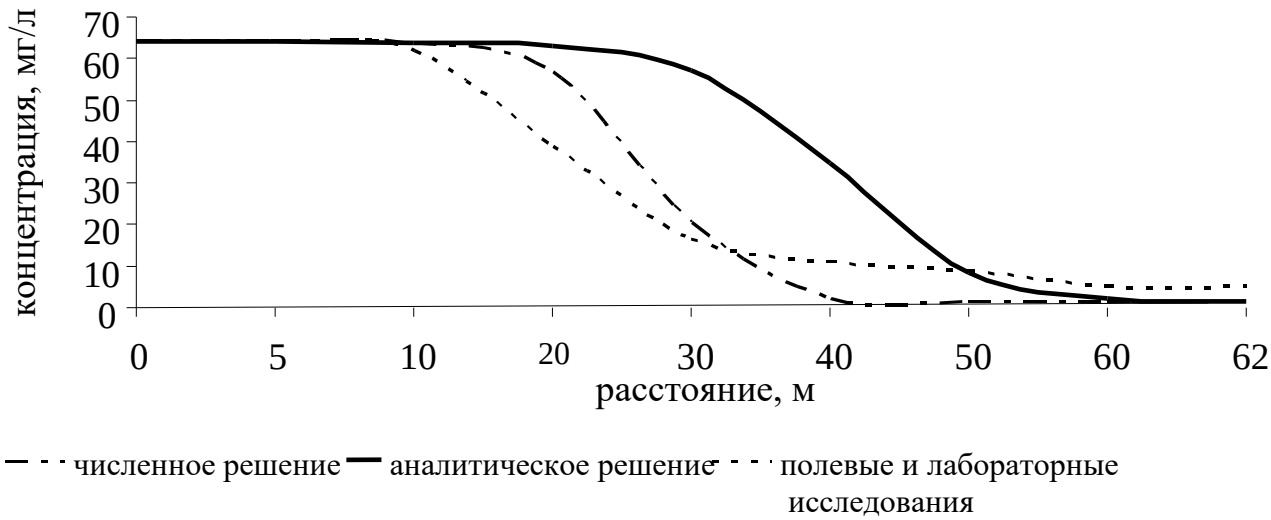



Рисунок 3.6 – Результаты полевых исследований и прогнозных расчетов миграции аммония в районе полигона ТКО через 50 лет

При полевом исследовании максимальное продвижение загрязнений выявлено на расстояниях, не превышающих 10 м от границы свалки.

Следует отметить, что миграция веществ происходит со скоростью, меньшей скорости движения порового раствора, что объясняется буферным свойствам почвы (по мере продвижения в почве с фильтрационным потоком аммонийный азот поглощаются ППК) [27].

Результаты моделирования горизонтального переноса аммонийного азота на период времени 75 лет (рисунок 24), что примерно соответствует прогнозу загрязнения подземных вод в настоящий период времени, позволяет сделать вывод о том, что на кривых, характеризующих распространение аммонийного азота в почвогрунтовой толще на расстоянии примерно 25 м (при численном решении) и 40 м (при аналитическом решении) можно

выделить зону максимального загрязнения грунтовых вод, с концентрацией близкой к содержанию аммония в фильтрате.

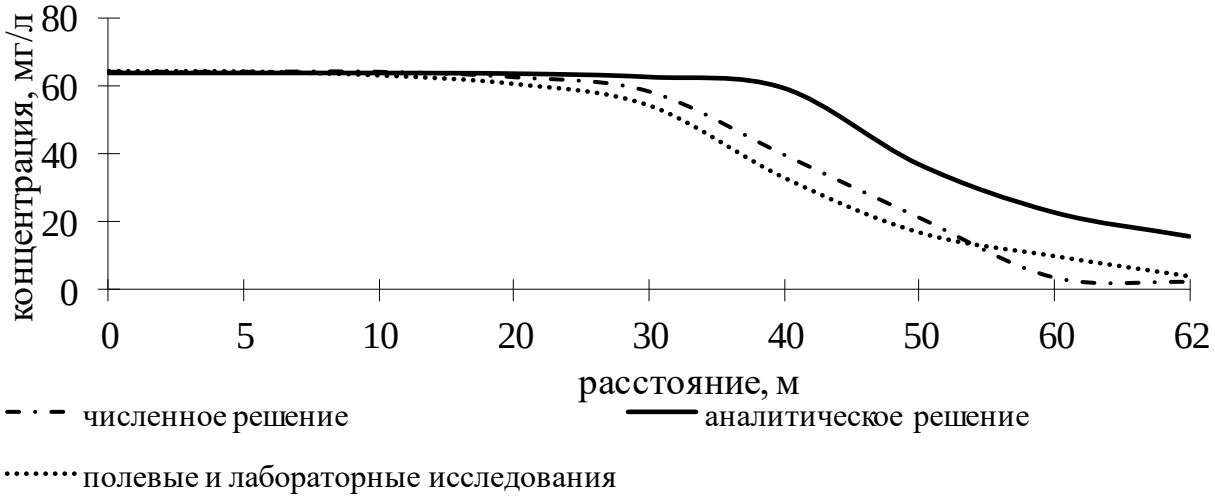



Рисунок 3.7 – Результаты прогнозных расчетов миграции аммония в районе свалки ТКО через 75 лет (настоящее время)

На основании численного моделирования и аналитического решения задачи миграции аммонийного азота (рисунок 3.8) можно сделать вывод о том, что через 100 лет с момента существования объекта исследования ионы аммония заполнят поровое пространство между свалкой и озером с предельной концентрацией 64 мг/л.

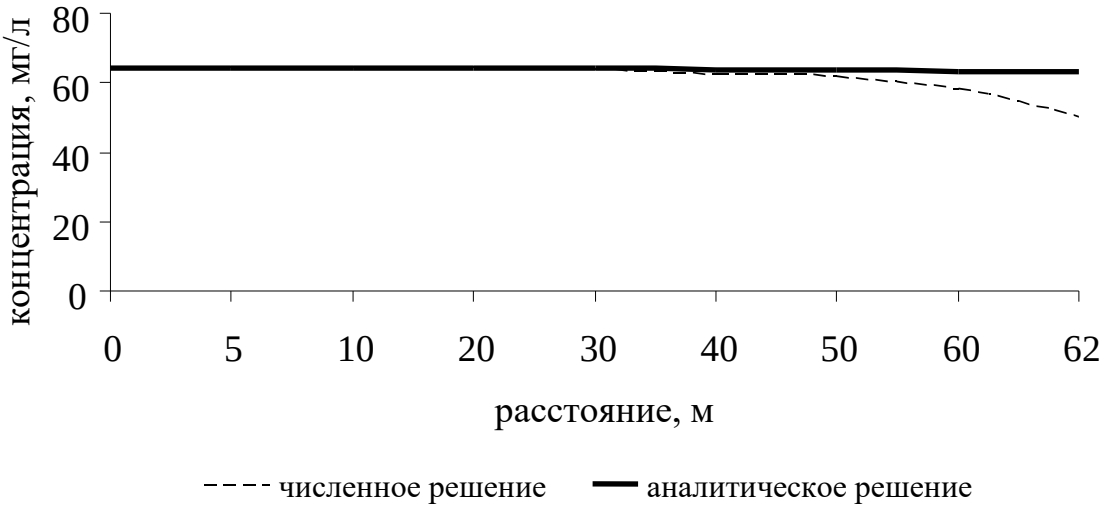



Рисунок 3.8 – Результаты прогнозных расчетов миграции аммония в районе полигона ТКО через 100 лет

Для прогнозирования загрязнения вод озера Селигер по результатам математического моделирования был построен график изменения концентрации $NH_4^+$ в фильтрационном потоке, поступающем в озеро со стороны объекта утилизации ТКО (рисунок 3.9).

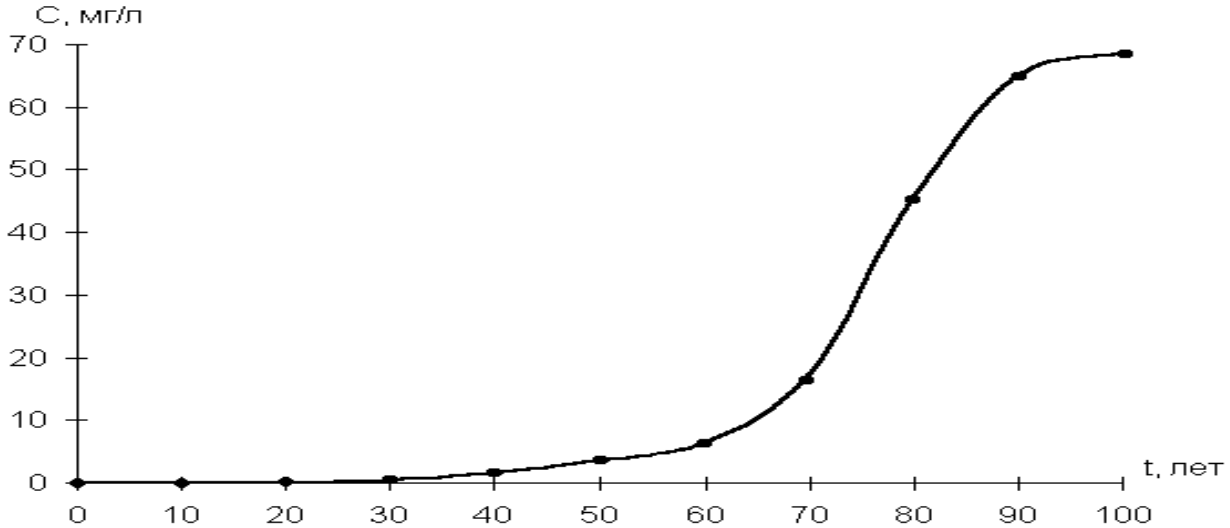



Рисунок 3.9 – График изменения концентрации иона $NH_4^+$ в выходном сечении фильтрационного потока в зависимости от времени.
($t_1 \approx 35$ лет - начало поступления загрязненных подземных вод в о. Селигер)

Анализ полученных зависимостей показал, что ионы аммония начинают поступать в озеро примерно после 35 лет эксплуатации свалки, а максимальная концентрация аммонийного азота 64 мг/л загрязнений в выклинивающемся в озеро Селигер фильтрационном потоке будет достигнута приблизительно через 100 лет.

В дальнейшем с использованием полученных выше данных о приведенной глубине загрязненного фильтрационного потока (рисунок 3.5) и концентрации иона $NH_4^+$ в поступающем в озеро фильтрате (рисунок 3.9) определялась интенсивность поступления загрязнений в озеро с фильтрационном потоком грунтовых вод по формуле (3.21)

$$q = \frac{C_{cp}(l) \cdot h_{cp} \cdot b \cdot v \cdot 365}{1000}, \qquad (3.21)$$

где $C_{ср}$ ($l$) – средняя концентрация иона $NH_4^+$ за рассматриваемый год в фильтрате, поступающем в озеро, мг/л; $h_{ср}$ – средняя приведенная глубина загрязненного фильтрационного потока в его выходном сечении за рассматриваемый год, м; b – ширина фильтрационного потока, м; v – средняя скорость фильтрации, м/сут; q – интенсивность поступления загрязнений в озеро, кг/год.

Следует отметить, что q = 1 кг/год соответствует поступлению в озеро в течение года 2564 м$^3$ воды с концентрацией иона $NH_4^+$, равной ПДК.

Полученная в результате расчетов зависимость интенсивности q от времени показана на рисунке 3.10. На данном рисунке отсчет времени вдоль оси абсцисс ведется от момента $t_1$ = 35 лет, когда загрязненный фильтрационный поток достигает озера.

Используя приведенную на рисунке 3.10 зависимость, можно рассчитать суммарное (накопленное) поступление загрязнений в озеро с момента $t_1$ по формуле (3.22)

$$Q(t) = \int_{t_1}^{t} q(t)dt \qquad (3.22)$$

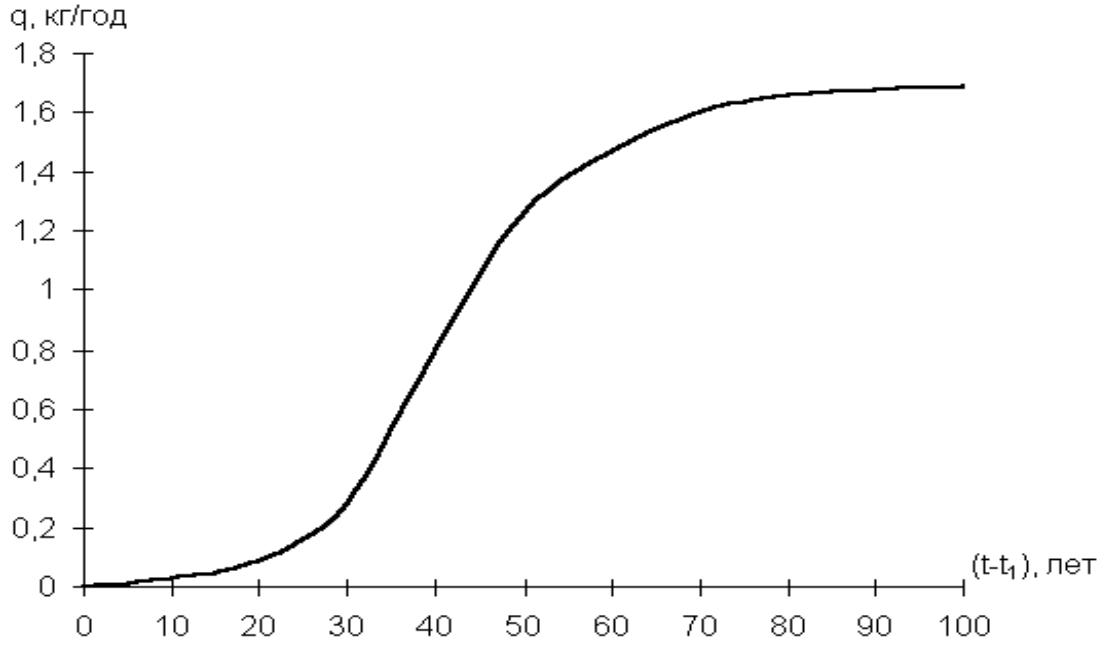



Рисунок 3.10 – Изменение интенсивности поступления загрязнений в озеро с фильтрационным потоком

Рассчитанная с использованием формулы (3.22) зависимость приведена на рисунке 3.11.

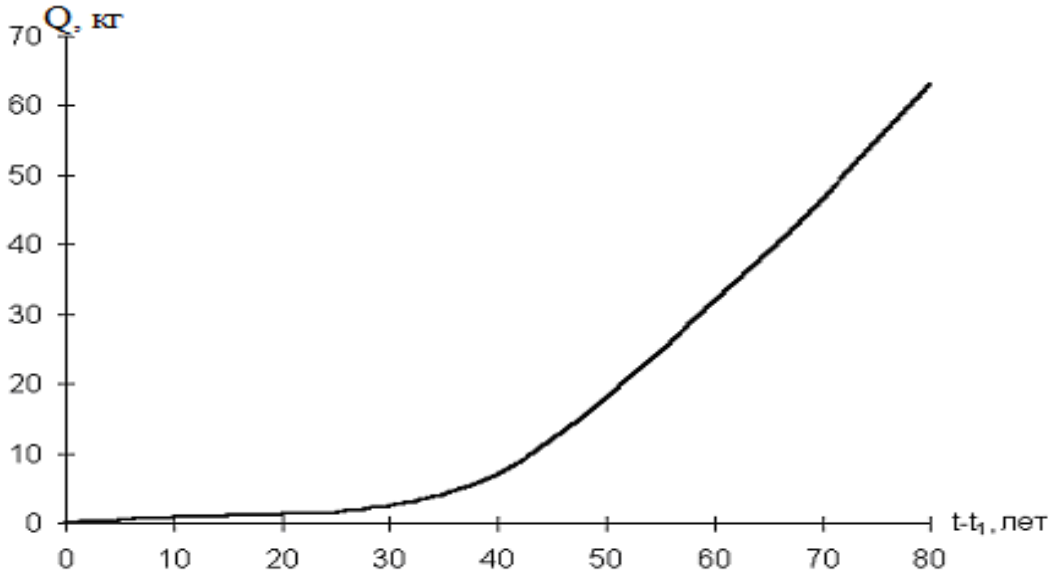



Рисунок 3.11 – Суммарное поступление иона $NH_4^+$ в озеро Селигер с фильтрационным потоком с момента начала поступления загрязнения в озеро

На основании результатов оценки суммарного поступления аммонийного азота в озеро был сделан вывод, что через 100 лет ионы $NH_4^+$ практически полностью заполнят поровое пространство между свалкой и озером с максимальной концентрацией 64 мг/л [27, 124].

### 3.5.2. Расчет распространения загрязняющих веществ в поверхностных водах

Выклинившиеся в озеро загрязненные грунтовые воды можно рассматривать как береговой выпуск, поэтому для расчета кратности начального и основного разбавления были использованы формулы (3.15) и (3.16), а расстояние между расчетными сечениями определялось по формуле (3.17).

Расчет значений концентраций аммонийного азота выполнялся с помощью компьютерного комплекса KS-PR, разработанной на факультете "Природопользование и инженерной экология" Тверского государственного

технического университета [132]. В результате было определено содержание аммонийного азота в разных створах на различным удалении от выпуска сточных вод.

В результате вычислений было получено, что в 2016 году в контрольном створе, т.е. на расстоянии около 500 м от берега содержание аммонийного азота становится ниже ПДК (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Содержание аммонийного азота в расчетных створах

| Год | Расстояние от пристани «Северная» до расчетных створов, м | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 100 | 250 | 500 | 750 | 1000 | 1500 | 2000 | 3000 |
| 1998 | 1,17 | 0,90 | 0,53 | 0,29 | 0,26 | 0,2 | 0,19 | 0,17 | 0,16 |
| 2016 | 1,6 | 1,02 | 0,65 | 0,49 | 0,32 | 0,23 | 0,21 | 0,2 | 0,18 |
| 2050 | 3,74 | 2,98 | 2,07 | 1,51 | 1,07 | 0,94 | 0,85 | 0,73 | 0,57 |

Однако к 2050 году при наиболее неблагоприятных условиях, т.е. при ветрах, дующих вдоль северного берега о. Городомля, в контрольном створе содержание аммонийного азота будет превышать ПДК приблизительно в 3 раза, а на расстоянии 2000 м от берега – примерно в 1,5 раза (рисунок 3.12).

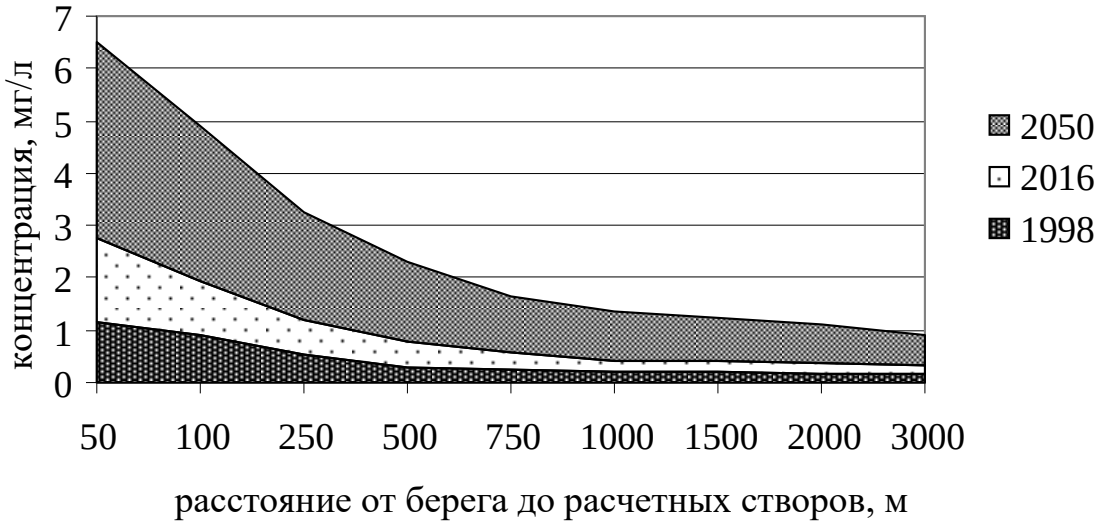



Рисунок 3.12 – Концентрация аммонийного азота в расчетных створах озера Селигер

Результаты компьютерных расчетов согласуются с данными наших полевых исследований вблизи острова Городомля.

## 3.6 Выводы по третьей главе

1. Моделирование миграции аммонийного азота позволило, установить динамику распределения ингредиентов в почвогрунтовой толще исследуемого объекта в зависимости от времени существования свалки.

2. В ближайшие годы не предвидится существенного увеличения загрязнения вод озера Селигер в районе пристани Северная за счет поступления загрязняющих веществ с выклинивающимся в озеро фильтрационным потоком. Однако, уже сейчас концентрация аммонийного азота в озере у берега вблизи свалки достигает 13·ПДК. В дальнейшем эта концентрация будет увеличиваться.

3. К настоящему времени максимальное загрязнение почвогрунтов и грунтовых вод распространилось примерно на 35 м от полигона ТКО и будет продвигаться в дальнейшем по направлению к озеру Селигер. Это загрязнение является необратимым на весьма длительную перспективу, так как даже в случае немедленного закрытия объекта депонирования отходов и прекращения поступления загрязнений в грунтовые воды загрязняющие вещества, уже аккумулированные в почвогрунтах и грунтовых водах, будут еще более 70 лет поступать в озеро Селигер с возрастающей интенсивностью.

4. На основании численного моделирования и аналитического решения задачи миграции аммонийного азота получено, что к 2050 г. ионы аммония заполнят поровое пространство между свалкой и озером с предельной концентрацией 64 мг/л.

5. В результате исследования распространения аммонийного азота с выклинивающимися в озеро Селигер грунтовыми водами, установлено, что в настоящее время концентрация $NH_4^+$ на расстоянии 500 м от берега

удовлетворяет нормативным требованиям. При прогнозировании распространения аммонийного азота в поверхностных водах на 2050 г. получено, что даже на расстоянии 2000 м от берега содержание $NH_4^+$ будет в 1,5 раза превышать ПДК.

6. Результаты вычислительных экспериментов и аналитических расчетов согласуются с данными полевых и лабораторных исследований объекта, что дает основание рекомендовать разработанные математические модели для прогнозирования миграции загрязнений от полигона ТКО.

# ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТА УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

## 4.1 Модель интеллектуального мониторинга объекта утилизации отходов

Важным средством управления состоянием объекта утилизации отходов является экологический мониторинг, позволяющий получить необходимую информацию о функционировании природно-технической системы.

Основными требованиями к информации, получаемой в ходе мониторинга состояния полигона ТКО являются: объективность, достоверность, надежность, адекватность, прозрачность, репрезентативность, научная обоснованность, соответствие законодательству РФ. Такая экологическая информация обеспечивает возможность не только получить оценку экологической ситуации, сложившейся на объекте утилизации коммунальных отходов, но и выявить причинно-следственные связи, позволяющие сделать прогноз ее развития.

Объективными факторами, в значительной мере, снижающими адекватность оценок параметров состояния окружающей среды на территории размещения полигонов ТКО являются:

– недостаточное для получения объективной информации количество постов наблюдения;

– низкая степень обеспечения постов наблюдений современными приборами и оборудованием;

– низкий уровень или отсутствие автоматизации процессов получения, обработки, хранения информации;

– отсутствие адекватных моделей прогноза экологической ситуации и алгоритмов комплексной обработки результатов мониторинга на объекте утилизации ТКО [141].

Оценка состояния объекта мониторинга природной среды заключается в определении отклонения значений параметров фактической (существующей в данный момент) экологической ситуации от значений этих же параметров, рассчитанных по математическим моделям данной территории, функционирующей в нормальном режиме.

В целях получения данных, позволяющих осуществить анализ параметров состояния объекта мониторинга и найти экологически значимые решения для уменьшения негативного воздействия полигона ТКО на окружающую среду, нами выполнены полевые и лабораторные исследования на объекте утилизации отходов, расположенной в поселке Солнечный Тверской области.

При проведении исследований определены основные функции системы мониторинга территории объекта, которая должна являться одной из составных элементов общей интеллектуальной системы управления территорией свалки ТКО:

– автоматизированный сбор информации о параметрах внешнего воздействия на объект утилизации отходов (компоненты множества L, например, $L_1$ – валовое количество атмосферных осадков);

– автоматизированный сбор информации о показателях состояния технической системы (компоненты множества X, например, $X_1$ – плотность захороненных отходов);

– автоматизированный сбор информации о параметрах окружающей природной среды (компоненты множества Y, например, $Y_1$ – уровень загрязнения атмосферы);

– обработка данных мониторинга и передача их лицам, принимающим управленческие решения, экологическим структурам, населению.

Представленные функции являются базовыми при организации работ по мониторингу экологической ситуации. В данной работе процесс интеллектуализации системы мониторинга представляет собой передачу части управляющих функций от человека к ЭВМ, для чего были разработаны

соответствующие математические модели, алгоритмы и программы, реализующие их. В результате в автоматизированную систему мониторинга объекта утилизации отходов были включены следующие дополнительные функции:

– моделирование и анализ экологической ситуации на рассматриваемом объекте в данный момент времени (компоненты множества $Z_1$);

– прогнозирование развития экологической ситуации (компоненты множества $Z_2$)

Для реализации рассмотренных функций системы мониторинга свалки ТКО необходимо выделить следующие составляющие (рисунок 4.1):

– контрольно-измерительный блок (сбор информации – компоненты множеств L, X, Y);

– блок оценки и анализа экологической ситуации на объекте исследования (оценка и анализ текущего состояния – параметры множества $Z_1$);

– блок прогнозирования развития экологической ситуации на объекте (прогноз состояния экосистемы – параметры множества $Z_2$).

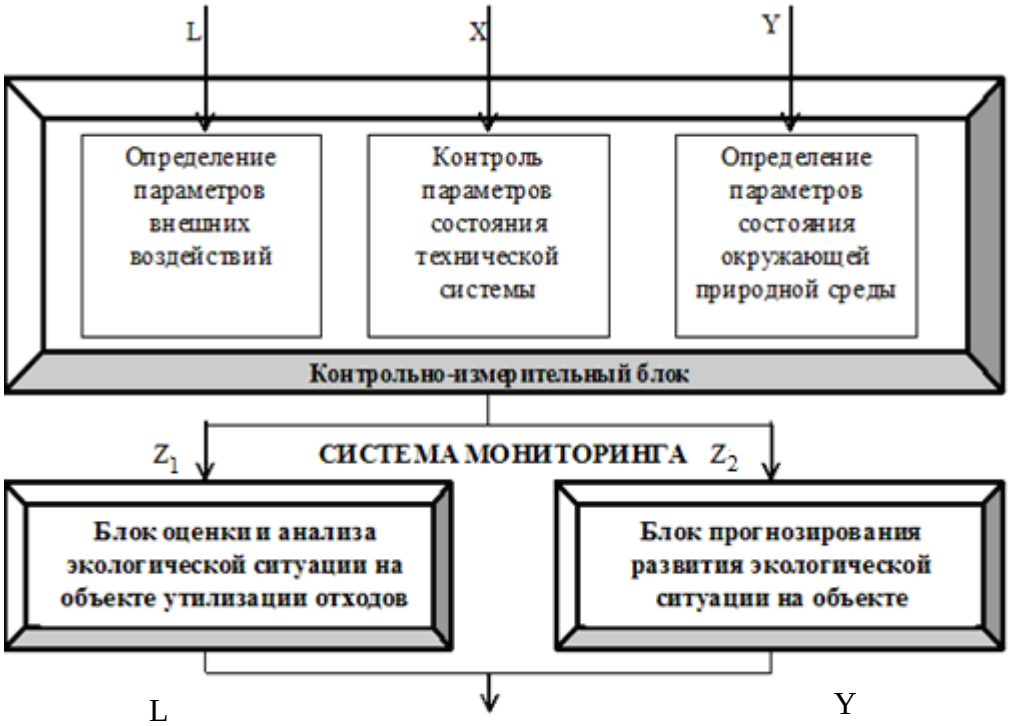



Рисунок 4.1 – Структурная схема интеллектуальной автоматизированной системы мониторинга полигона ТКО пос. Солнечный

Блоки автоматизированной системы мониторинга полигона ТКО должны быть достаточно мобильными и адаптированными к изменяющимся условиям внешней среды и параметрам состояния объекта. Это обеспечит сбор полной и достоверной информации, которая позволит выбрать рациональные и эффективные сценарии по управлению составляющими системы мониторинга.

Контрольно-измерительный блок выполняет сбор данных для оценки фактического состояния полигона ТКО.

При построении и организации функционировании контрольно-измерительного блока необходимо решить следующие задачи:

– найти рациональную приборную комплектацию;

– сформировать достаточное количество структурных единиц, осуществляющих контроль параметров и наиболее рациональное их размещение на территории объекта мониторинга.

Природно-технический объект утилизации отходов в соответствии с теорией автоматического управления представляет собой слабодетерминированную, многопараметрическую систему, что затрудняет создание автоматизированной системы мониторинга полигона ТКО. Поэтому для эффективного управления объектом утилизации отходов и оптимизации затрат необходимо выбрать такие параметры мониторинга и управления, которые в наибольшей степени отражают состояние природно-технической системы утилизации отходов.

Поскольку исследуемый полигон ТКО пос. Солнечный относится к категории «старых» свалок, то ведущим фактором, оказывающим влияние на состояние природно-технической системы, является фильтрат. Поэтому мониторинг объекта утилизации отходов направлен на контроль состояния водно-эмиссионных потоков на полигоне ТКО поселка для принятия решений по их эффективному управлению [143].

## 4.2 Оценка экологического риска объекта утилизации отходов

Регулирование взаимосвязей в природно-технических системах утилизации отходов является одним их основных этапов организации оптимального природопользования. На протяжении всего жизненного цикла объектов депонирования отходов происходят качественные и количественные изменения эмиссионных потоков, что связано с сукцессионными процессами таких систем. Исследование механизмов, регулирующих потоки загрязняющих веществ на полигонах ТКО, позволит дать количественную оценку экологического риска и разработать технологические решения для управления этим риском. Экологическая оценка риска представляет собой сложный научно-практический процесс, результат которого зависит от качества исходной информации (рисунок 4.2) [3].

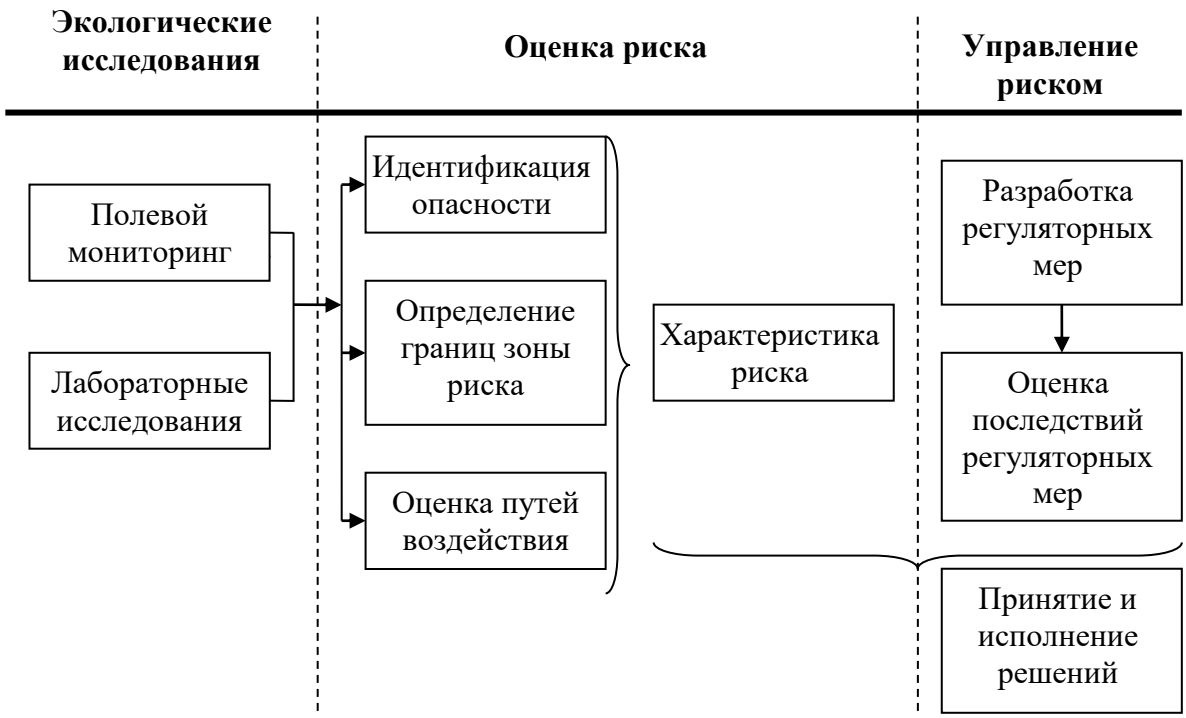



Рисунок 4.2 –Схема исследований в процессе экологической оценки риска [3]

Процесс оценки экологического риска объекта утилизации отходов включает следующие этапы:

1. Идентификация состояния объекта (сбор информации), включающая проведение полевого и лабораторного мониторинга, ознакомление с базами данных, экологическим законодательством.

2. Идентификация экологических воздействий, нацеленная на прогнозирование состояния объекта, включающая выявление эмиссионных потоков загрязнений и географических границ их влияния на окружающую природную среду.

3. Характеристика риска, оценивающая опасность воздействий объекта на окружающую среду.

4. Управление риском, включающее проведение постоянного или периодического мониторинга состояния объекта, меры регулирования эмиссионных потоков загрязнений.

Следует отметить, что управление риском является, прежде всего, процессом принятия решений по снижению экологического риска и минимизации воздействия объекта утилизации отходов на окружающую природную среду.

Для определения экологического риска объекта утилизации отходов пос. Солнечный используется метод, основанный на комплексной оценке экологического риска природно-технических систем депонирования отходов по разным категориям критериев [16, 143, 144]:

– территориальные: требования законодательства к размещению объектов утилизации отходов;

– геологические и гидрогеологические: геологические и гидрогеологические условия расположения полигона ТКО;

– технологические: технологическое оснащение участка утилизации отходов;

– биохимическая стабильность отходов: параметры биохимической стабильности отходов, определяющие уровень эмиссий фильтрата и биогаза.

Алгоритм определения экологического риска объекта утилизации отходов представлен на рисунке 4.3.

Рисунок 4.3 – Алгоритм анализа экологического риска полигона ТКО

В качестве исходных данных для оценки использовались результаты полевого и лабораторного мониторинга объекта исследования.

Согласно методике, каждая группа критериев ранжируется с определением весовых коэффициентов, что позволяет из всего множества критериев выбрать те, которые являются ведущими в анализе риска.

Выбор критериев базируется на законодательных требованиях и запретах на размещение объектов утилизации отходов, поэтому для каждого критерия из группы устанавливается максимальное значение.

Фактор влияния критерия является вероятностной величиной отражающий опасность проявления и уровень отрицательного воздействия объекта депонирования отходов на окружающую природную среду.

Для каждого выбранного критерия фактор влияния определяется на основании нормативных параметров, технических и технологических требований к территории размещения объектов утилизации отходов, а также полевых и лабораторных исследований [16, 145–147].

Комплексный экологический риск объекта утилизации отходов (R) определяется по формуле (34) [16]

$$R = \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot K_i \cdot F_i, \tag{4.1}$$

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.

Ведущие критерии и факторы влияния критериев оценки экологического риска объекта утилизации отходов приведены в таблице 4.1. Существующий подход оценки риска, предложенный в работе [16] был дополнен параметрами, учитывающими оснащенность территории объекта наблюдательными пунктами контроля загрязнений и его расположение относительно населенного пункта.

Таблица 4.1 – Ведущие критерии и факторы влияния критериев оценки экологического риска объекта утилизации отходов

| № | Критерий | Весовой коэффициент $K_i$ | Фактор весомости критерия $F_i$ | Описание критерия |
|---|---|---|---|---|
| Территориальный критерий ($G_i$=100) | | | | |
| 1.1 | Удаленность от жилой застройки | 1,0 | 1 | >500 м |
| | | | 4 | < 500 м |
| 1.2 | 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 |
| 1.3 | Удаленность от поверхностных водоемов | 1,0 | 1 | > 1000 м |
| | | | 2 | 500 – 1000 м |
| | | | 3 | 300 – 500 м |
| | | | 4 | < 300 м |
| 1.4 | Расположение объекта относительно категории лесов | 1,0 | 1 | 3-я группа |
| | | | 4 | 1-я и 2- группа |
| 1.5 | Расстояние до ближайшего аэропорта | 1,0 | 1 | > 15 км |
| | | | 4 | <15 км |
| 1.6 | Расположение объекта относительно ООПТ | 1,0 | 1 | Вне территории ООПТ |
| | | | 4 | На территории ООПТ |
| 1.7 | Расположение объекта относительно рекреационных зон | 1,0 | 1 | Вне территории зон рекреации |
| | | | 4 | На территории зон рекреации |
| 1.8 | Расположение объекта относительно курортных зон | 1,0 | 1 | Вне территории курортных зон |
| | | | 4 | На территории курортных зон |
| 1.9 | Расположение объекта относительно земель с/х назначения | 1,0 | 1 | Вне с/х территорий |
| | | | 4 | На с/х территориях |

Продолжение таблицы 4.1

| № | Критерий | Весовой коэффициент $K_i$ | Фактор весомости критерия $F_i$ | Описание критерия |
|---|---|---|---|---|
| 1.10 | Расположение относительно населенного пункта | 1,0 | 1 | < 1000 м |
| | | | 4 | > 1000м |
| Геологические и гидрогеологические ($G_i$=50) | | | | |
| 2.1 | Коэффициент фильтрации подстилающих грунтов, м/с | 0,45 | 1 | $10^{-9}$ |
| | | | 2 | $10^{-7} – 10^{-9}$ |
| | | | 3 | $10^{-5} – 10^{-7}$ |
| | | | 4 | $< 10^{-5}$ |
| 2.2 | Глубина залегания грунтовых вод, м | 0,30 | 1 | > 5 |
| | | | 2 | 2 – 5 |
| | | | 3 | 1 – 2 |
| | | | 4 | < 1 |
| 2.3 | Мощность глинистого слоя в основании, м | 0,20 | 1 | > 2 |
| | | | 2 | 1 – 2 |
| | | | 3 | 0,5 – 1 |
| | | | 4 | < 0,5 |
| 2.4 | Вероятность затопления/подтопления территории | 0,1 | 1 | Отсутствует |
| | | | 2 | В период сильных паводков |
| | | | 3 | В осенне-весенний период |
| | | | 4 | Постоянное подтопление |
| Биохимическая стабильность отходов в массиве захоронения ($G_i$=25) | | | | |
| 3.1 | Содержание промышленных отходов, % | 0,35 | 1 | 0 |
| | | | 2 | < 25 |
| | | | 3 | 25 – 50 |
| | | | 4 | > 50 |
| 3.2 | Содержание биоразлагаемой | 0,3 | 1 | < 10 |
| | | | 2 | 10 – 30 |

Продолжение таблицы 4.1

| № | Критерий | Весовой коэффициент $K_i$ | Фактор весомости критерия $F_i$ | Описание критерия |
|---|---|---|---|---|
| | фракции отходов, % | | 3 | 30 – 60 |
| | | | 4 | 60 – 100 |
| 3.3 | Возраст объекта, лет | 0,3 | 1 | > 30 |
| | | | 2 | 15 – 30 |
| | | | 3 | 5 – 15 |
| | | | 4 | < 5 |
| 3.4 | Влажность отходов в массиве, % влажн. в-во | 0,2 | 1 | < 20 |
| | | | 2 | 20 – 40 |
| | | | 3 | 40 – 60 |
| | | | 4 | > 60 |
| Технологические критерии ($G_i$= 5) | | | | |
| 4.1 | Наличие системы сбора и очистки фильтрата | 0,2 | 1 | На объекте имеется система сбора и очистки фильтрата |
| | | | 2 | Глинистое основание, фильтрат копится в теле свалки |
| | | | 3 | Глинистое основание, фильтрат копится в понижениях местности |
| | | | 4 | Фильтрат просачивается в подстилающие грунты |
| 4.2 | Наличие системы наблюдательных пунктов контроля загрязнений | 0,15 | 1 | На объекте имеется система наблюдательных пунктов |
| | | | 4 | На объекте отсутствует система наблюдательных пунктов |
| 4.3 | Рекультивация закрытых участков складирования, % | 0,15 | 1 | 100 |
| | | | 2 | 50 – 100 |
| | | | 3 | < 50 |
| | | | 4 | 0 |
| 4.4 | Площадь объекта, га | 0,15 | 1 | > 20 |

Окончание таблицы 4.1

| № | Критерий | Весовой коэффициент $K_i$ | Фактор весомости критерия $F_i$ | Описание критерия |
|---|---|---|---|---|
| | | | 2 | 5 – 20 |
| | | | 3 | 1 – 5 |
| | | | 4 | < 1 |
| 4.5 | Статус объекта | 0,1 | 1 | Выведен из эксплуатации, рекультивирован |
| | | | 4 | Действующий/выведенный из эксплуатации не рекультивирован |

На основании комплексной оценки экологического риска проводится ранжирование объекта размещения отходов ТКО по степени их воздействия на окружающую среду (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Ранжирование объектов утилизации отходов по величине комплексного экологического риска

| Комплексный риск R | Потенциал опасности | Уровень воздействия | Рекомендуемые меры |
|---|---|---|---|
| > 1250 | Высокий | Размещение и эксплуатация объектов осуществляется (или осуществлялась) с нарушениями природоохранных норм. Объект является потенциальным источником сверхнормативного воздействия на окруж. среду | Приоритетные мероприятия по выводу объекта из эксплуатации, ликвидации и/или рекультивации |
| 1050 – 1250 | Умеренный | Природоохранные мероприятия выполняются на объекте в полном объеме. Объект является потенциальным источником воздействия на окруж. среду | Проведение мероприятий по доведению объекта до нормативных требований |

Окончание таблицы 4.2

| | | | |
|---|---|---|---|
| < 1050 | Приемлемый | Объект не оказывает существенного воздействия на окружающую среду | Продолжение эксплуатации. Проведение дополнительных мероприятий при необходимости |

Таблица 4.3 – Результаты оценки комплексного экологического риска полигона ТКО пос. Солнечный

| № критерия | $G_i$ | $K_i$ | $F_i$ | $R_i$ |
|---|---|---|---|---|
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| 1.1 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 1.2 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 1.3 | 100 | 1,0 | 4 | 400 |
| 1.4 | 100 | 1,0 | 4 | 400 |
| 1.5 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 1.6 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 1.7 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 1.8 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 1.9 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 1.10 | 100 | 1,0 | 1 | 100 |
| 2.1 | 50 | 0,45 | 4 | 90 |
| 2.2 | 50 | 0,30 | 3 | 45 |
| 2.3 | 50 | 0,2 | 3 | 30 |
| 2.4 | 50 | 0,1 | 2 | 10 |
| 3.1 | 25 | 0,35 | 0 | 0 |
| 3.2 | 25 | 0,30 | 2 | 15 |
| 3.3 | 25 | 0,3 | 1 | 7,5 |
| 3.4 | 25 | 0,2 | 1 | 5 |
| 4.1 | 5 | 0,2 | 4 | 4 |
| 4.2 | 5 | 0,15 | 1 | 0,75 |
| 4.3 | 5 | 0,15 | 4 | 3 |

Окончание таблицы 4.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| 4.4 | 5 | 0,15 | 4 | 3 |
| 4.5 | 5 | 0,1 | 4 | 2 |
| | | | | Σ1815,25 |

На основании критериев ранжирования объектов утилизации отходов, получено значение комплексного экологического риска равное 1815,25.

Согласно классификации объектов размещения отходов по степени экологического риска (таблица 4.2) исследуемый полигон ТКО пос. Солнечный относится к потенциально опасным, представляющим угрозу для здоровья населения и окружающей природной среды [146, 147].

Поэтому для такого объекта утилизации отходов требуется принятие решений по снижению негативной нагрузки на экосистему.

## 4.3. Управление водными эмиссионными потоками объекта утилизации отходов

Проблема управления водными эмиссионными потоками на объектах захоронения ТКО для повышения степени безопасности их эксплуатации стоит весьма остро, но ее решение затруднено в связи с недостаточной разработкой методических рекомендации по основным аспектам управления водным балансом свалки.

Одним из факторов негативного влияния объектов депонирования ТКО на водные экосистемы является образование фильтрата, содержащего высокие концентрации токсичных веществ, способных длительное время сохраняться в теле свалки. Для реализации концепции экологической устойчивости объектов захоронения ТКО необходимо достигать приемлемого уровня равновесия с окружающей природной средой, чему будет способствовать внедрение эффективных управленческих воздействий на эмиссионные потоки природно-технических экосистем.

Модель водного баланса объекта захоронения ТКО поселка Солнечный может быть схематически представлена в виде полузакрытой системы входящих и выходящих водных эмиссионных потоков, формирующихся под воздействием внутренних и внешних параметров. При таких допущениях уравнение водного баланса будет иметь вид [148]:

$$(Q_{АО} + Q_{ОВ} + Q_{ПС} + Q_{ИНТР}) = (Q_{ПСП} + Q_{БГ} + Q_{БД} + Q_{ИС} + Q_{ПР}), \quad (4.2)$$

где *входящие эмиссионные потоки*:

$Q_{АО}$ – количество атмосферных вод, поступающих на поверхность полигона ТКО;

$Q_{ОВ}$ – количество отжимной влаги, выделяющейся из отходов при их захоронении;

$Q_{ПС}$ – количество воды, поступающей с поверхностным стоком от территорий расположенных выше по рельефу;

$Q_{ИНТР}$ – количество воды, поступающей в тело полигона ТКО из подземных источников (интрузия);

*выходящие эмиссионные потоки*:

$Q_{ПСП}$ – количество воды, покидающей полигон ТКО с поверхностным стоком;

$Q_{БГ}$ – потеря влаги за счет выделения биогаза;

$Q_{БД}$ – количество воды, потребляемое в процессе биохимического разложения отходов;

$Q_{ИС}$ – количество воды расходуемое за счет ее испарения и на транспирацию растений;

$Q_{ПР}$ – количество воды инфильтрующейся из тела полигона ТКО в подземные горизонты.

С учетом управленческих воздействий основное уравнение баланса водными эмиссионными потоками объекта захоронения ТКО будет иметь вид:

$$Q_{АО} + Q_{ОВ} + Q_{ПС} + Q_{ИНТР} + Q_{Р} + Q_{УВ} = Q_{ПСП} + Q_{БГ} + Q_{БД} + Q_{ИС} + Q_{ПР} + Q_{ДР}, \quad (4.3)$$

где:

$Q_Р$ – количество воды, направляемой для увлажнения массы отходов с последующей рециркуляцией образуемого фильтрата;

$Q_{УВ}$ – количество воды подаваемой на поверхность полигона ТКО для увлажнения отходов в пожароопасный период;

$Q_{ДР}$ – количество воды, отводимой дренажной системой сбора фильтрата.

Для достижения экологической устойчивости при применении эффективных управлений эмиссионными потоками объекта депонирования отходов необходимо с достаточной точностью определить объем образующегося фильтрата. Его состав и количество зависят от жизненного цикла полигона ТКО.

В настоящее время применяются различные подходы к определению объема фильтрата, но наибольшее практическое применение получили методики, основанные на составлении водного баланса объекта захоронения ТКО [150–152].

$$V_ф = (Q_{АО} + Q_{ОВ}) - (Q_{ПС} + Q_{ИС} + Q_{БГ} + Q_{БД} + Q_{ВНО}), \quad (4.4)$$

где:

$V_ф$ – объем, образующихся в теле свалки фильтрационных вод;

$Q_{ВНО}$ – количество воды, направленное на насыщение отходов до полной влагоемкости.

В результате исследований получены данные о количествах образовавшегося на объекте депонирования отходов фильтрата с учетом средних многолетних величин атмосферных осадков.

Проведенный по методике [150–152] расчет объема образования фильтрата для полигона ТКО поселка Солнечный позволил установить, что количество атмосферных осадков, выпадающих на рабочую поверхность тела объекта захоронения отходов, формирует основной объем образующегося фильтрата (рисунок 4.4).

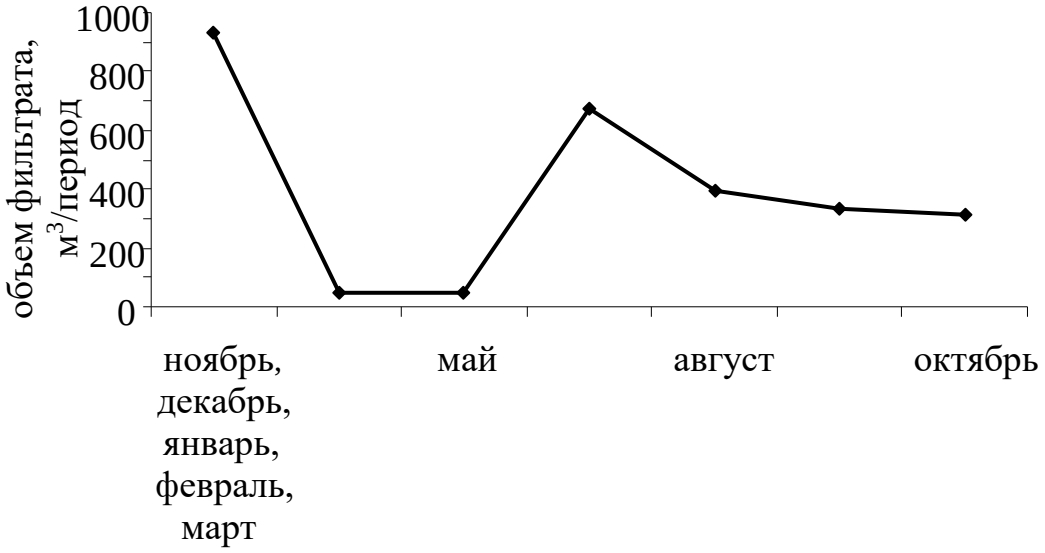



Рисунок. 4.4 – Динамика образования фильтрата полигона ТКО пос. Солнечный

Для исследования возможности управления и очистки фильтрата полигона ТКО поселка Солнечный было проведено его обследование, заключающееся в отборе проб загрязненных вод для их лабораторного анализа, проводимого по стандартным методикам [127–129]. Анализ показал, что фильтрационные воды загрязнены рядом органических и неорганических соединений, в том числе соединениями азота (таблицы 2.1 – 2.8) значительно превышающими ПДК [153, 154].

Таким образом, в условиях техногенного воздействия полигона ТКО на окружающую среду вокруг него формируется зона геохимической аномалии с повышенным содержанием химических веществ. Поскольку объект утилизации отходов располагается в водоохранной зоне озера Селигер, то в результате миграции загрязнений негативному влиянию полигона ТКО подвергаются не только грунтовые, но и поверхностные воды (таблица 3.1).

С целью снижения экологического риска исследуемого объекта утилизации отходов, предложено принять решения по управлению элементами гидросферы изучаемой территории.

Для управления эмиссионными потоками на полигоне ТКО поселка Солнечный с учетом условий расположения объекта захоронения отходов, разработана схема сбора, отвода и рециркуляции фильтрата (рисунок 4.5).

Предложенная система включает сбор и отвод поверхностных вод, что позволит уменьшить инфильтрацию атмосферных осадков через рабочее тело свалки ТКО.

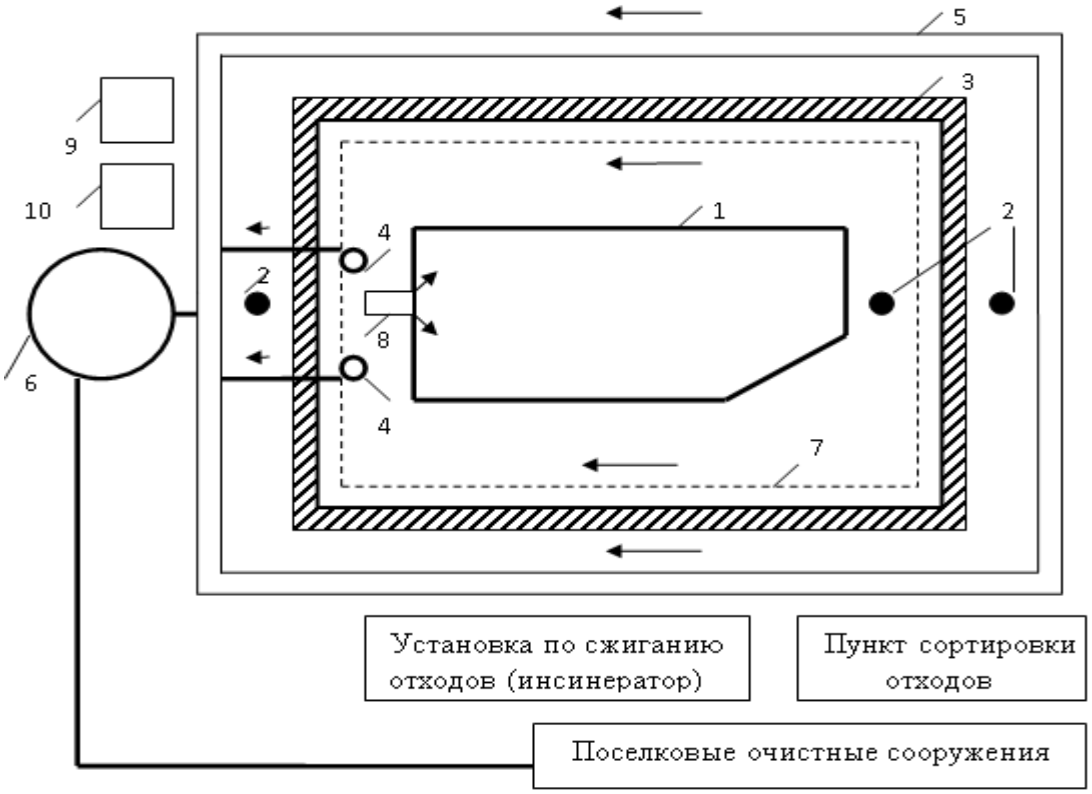
Для отвода фильтрата из тела полигона ТКО предусмотрена дренажная сеть, которая направляет поток в отстойник-накопитель, в котором осуществляется накопление, усреднение и отстаивание фильтрата. По мере наполнения емкости отстойника, фильтрационные воды направляются на очистные сооружения.

Кроме того, предлагается по контуру полигона ТКО возвести противофильтрационную завесу, для отвода транзитного грунтового потока и обводного канала для перехвата поверхностного стока от района загрязнения. Грунтовые воды обтекают противофильтрационную завесу с внешней стороны и также как и поверхностные воды не получают загрязнения на территории объекта захоронения ТКО. Уровень загрязненных фильтрационных вод внутри контура завесы поддерживается ниже уровня грунтовых вод за контуром завесы. Мониторинг уровня фильтрационных вод и контроль загрязнений внутри контура ведется с помощью наблюдательных скважин, расположенных с внешней и внутренней стороны противофильтрационной завесы [158].

Противофильтрационная завеса представляет собой траншею, в которой размещают материал с низкими фильтрационными свойствами (например, глины).

Для полигона ТКО пос. Солнечный рекомендуется использовать донные отложения, добываемые из озера Долгое, расположенного на территории поселка. Противофильтрационный материал на основе донных отложений получают с помощью экологического восстановления.

а)




б)

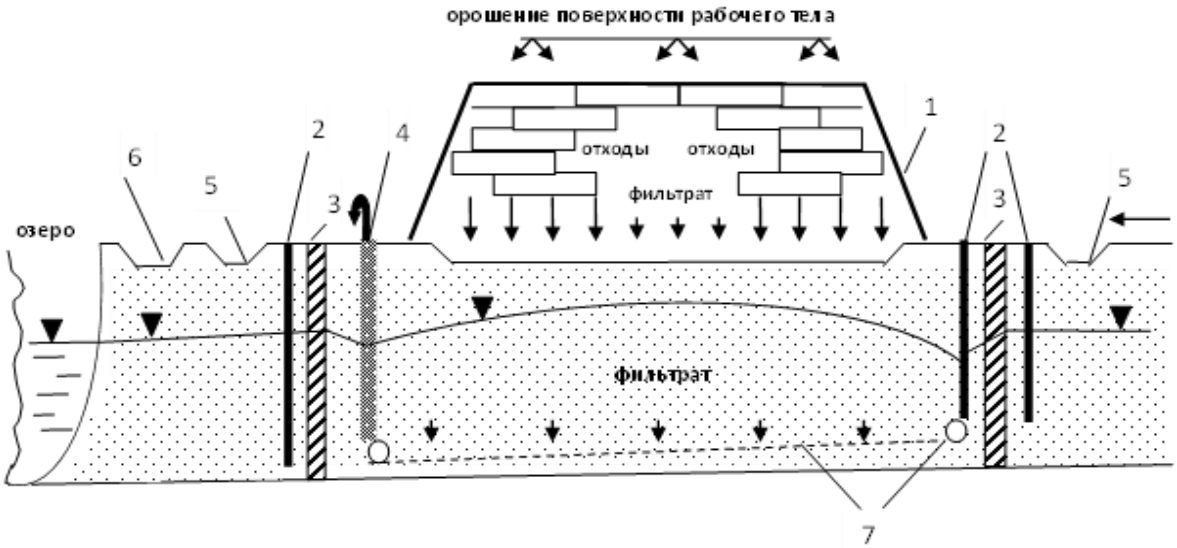



Рисунок 4.5 – Схема сбора, отвода и рециркуляции фильтрата полигона ТКО

1 – рабочее тело полигона ТКО; 2– наблюдательные скважины; 3 – противофильтрационная завеса; 4 – водосборная скважина-колодец; 5 – контурный водоотводной канал; 6 – сборный резервуар-отстойник; 7 – дренажные трубы; 8 – установка для орошения тела свалки; 9 – мобильная насосная станция; 10 – компрессорная установка.

Коэффициент фильтрации донных отложений соответствует этому показателю для глин и в среднем равен $2,5 \cdot 10^{-9}$ м/с.

С помощью мобильной компрессорной установки в зависимости от уровня загрязнений предлагается подавать в отстойник воздух для окисления химических веществ и интенсификации процессов очистки воды. По мере наполнения емкости отстойника, фильтрационные воды направляются на очистные сооружения.

Скорость и интенсивность протекания биохимических процессов определяются количеством воды, присутствующем в теле свалки, поэтому необходимо поддерживать определенную влажность захораниваемых отходов. Для этого фильтрационные воды после очистки направляются на «промывку» рабочего тела полигона ТКО постоянным током рециркуляционной воды. Подача воды на рабочее тело свалки для орошения помощью дождевальных аппаратов с одной стороны увеличивает расходную часть водного баланса за счет повышения испарения при орошении, а с другой снижает риск возникновения пожара на объекте в опасные в этом отношении периоды года.

Поселковые очистные сооружение расположены рядом с территорией полигона ТКО (около 100 м), поэтому возможна совместная очистка фильтрационных и сточных вод поселка Солнечный [152, 155–157].

Для повышения эффективности очистки совместного стока, предлагается в технологическую схему очистки сточных вод включить обратноосмотические аппараты. Технологии обратного осмоса позволяют очищать высококонцентрированные стоки, эффективно удаляют из воды не только загрязнения в ионной форме (аммоний), но и растворенные органические соединения. Так, современные обратноосмотические мембраны позволяют снижать концентрацию аммонийного азота в 20 – 30 раз [159].

Кроме того, при практическом применении систем обратного осмоса на полигонах ТКО, решается проблема утилизации концентрата, образуемого при эксплуатации обратноосмотических аппаратов, за счет его возвращения в

«тело» полигона путем равномерного разбрызгивания над поверхностью (рисунок 4.5) [151, 159].

### 4.3.1. Прогнозирование совместного распространения в поверхностных водах загрязняющих веществ, выклинивающихся с фильтрационным потоком и сбрасываемых с поселковых очистных сооружений

В данном разделе выполним прогноз распространения загрязняющих веществ в озере Селигер при организации отвода загрязненных подземных вод на поселковые очистные сооружения и после их общей очистки со сточными водами поселка Солнечный.

Расчета кратности начального и основного разбавления проводился на основе формул (3.16) и (3.17) соответственно, поскольку сброс сточных вод поселка осуществляется с помощью выпуска, находящийся на расстоянии 150 м от берега.

Для оценки характера распространения загрязнений сточных вод в водном объекте использовались их осредненные концентрации из данных девяти определений при разработке проекта нормативно-допустимого сброса (НДС) очистных сооружений: взвешенные вещества – 28,0 мг/л, азот аммонийный – 17,5 мг/л, нитриты – 0,25 мг/л, нефтепродукты – 0,22 мг/л, $БПК_{полн}$ – 31,6 $мгO_2/л^3$, растворенный кислород – 6,38 $мгO_2$/л.

Средняя концентрация ингредиентов определялась по формуле (4.5) [57, 141]:

$$C_{ср} = \frac{C_{ос} \cdot q_{ос} + C_{тбо} \cdot q_{тбо}}{q_{ос} + q_{тбо}}, \qquad (4.5)$$

где $C_{ос}$ и $C_{тбо}$– концентрации ингредиента (например, аммонийного азота) в сточных водах, сбрасываемых в Селигер с очистных сооружений поселка, и в грунтовых водах, выклинивающихся в Селигер в районе полигона ТКО соответственно, мг/л; $q_{ос}$ – расход сточных вод с очистных сооружений

поселка, $м^3$/сут; $q_{тбо}$ – расход грунтовых вод, разгружающихся в озеро в районе полигона ТКО, $м^3$/сут.

Прогнозная оценка распространения загрязняющих веществ проводилась с помощью программного комплекса KS-PR, разработанного в Тверском техническом университете. Расчет проводился с учетом двух вариантов: первый – с учетом концентрации аммонийного азота в загрязненных подземных водах выклинивающихся в озеро Селигер в 2016 г. и второй – для значений концентрации аммонийного азота в подземных водах, которые прогнозируются в 2050 г.

Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что концентрации аммонийного азота в озере на протяжении для длительного периода времени, начиная с расстояния 1000 м от берега остается практически на одном уровне (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Концентрации аммонийного азота в расчетных створах

| Год | Расстояние от берега до расчетных створов, м | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 100 | 250 | 500 | 750 | 1000 | 1500 | 2000 | 3000 |
| 2016 | 1,19 | 0,92 | 0,54 | 0,28 | 0,20 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| 2050 | 1,24 | 0,96 | 0,56 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |

Таким образом, при совместной очистке загрязненных грунтовых вод со сточными водами поселка, концентрация аммонийного азота будет меньше ПДК на расстоянии 500 м от пристани за счет разбавления озерной водой (рисунок 4.6).

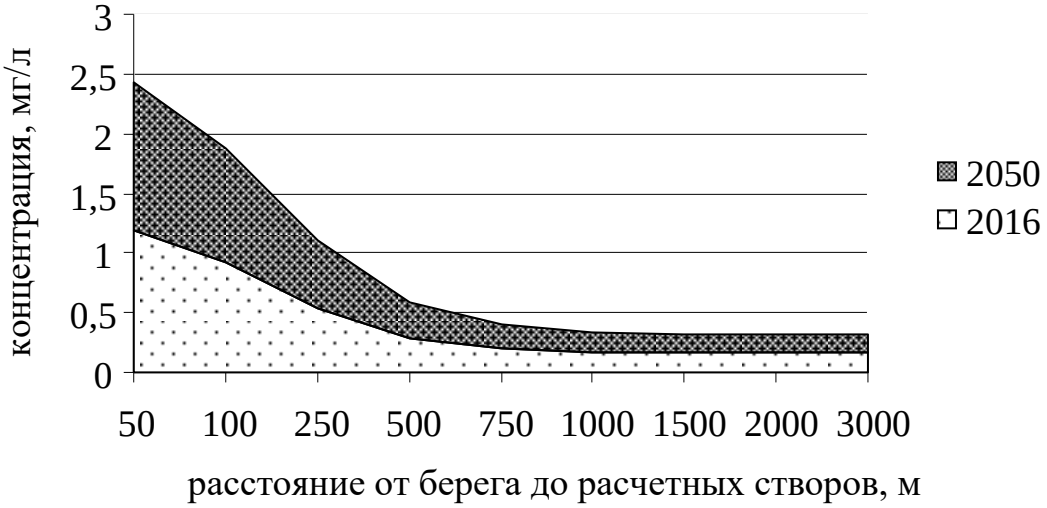



Рисунок 4.6 – Распространение аммонийного азота в озере Селигер при совместной очистке фильтрационных вод полигона ТКО и поселковых сточных вод

## 4.4. Выводы по четвертой главе

1. Для обеспечения экологической безопасности и эффективного управления объектами утилизации предлагается использовать подход, включающий на первом этапе проведение мониторинга объекта захоронения отходов; на втором этапе оценка экологического риска объекта, на третьем этапе принятие решений по снижению риска и управлению объектов размещения отходов.

2. Предложены основные принципы организации экологического мониторинга объекта утилизации отходов. Определены основные функции интеллектуальной автоматизированной системы мониторинга полигона ТКО. Организация практического функционирования системы мониторинга технической системы позволит принимать управленческие решения, направленные на регулирование экологической ситуации и ликвидации негативных последствий воздействия свалок на окружающую природную среду.

3. На основании критериального подхода выполнена оценка экологического риска объекта утилизации отходов поселка Солнечный. Получено, что исследуемый полигон ТКО относится к потенциально опасным, представляющим угрозу для здоровья населения и окружающей природной среды.

4. В результате исследований установлено, что основной объем образующегося фильтрата полигона ТКО поселка Солнечный формирует количество выпавших на поверхность его рабочего тела атмосферных осадков. Анализ долевого участия основные факторов формирования водного баланса полигона ТКО позволил сформулировать основные аспекты построения системы управления отводом фильтрата и поверхностных стоков, снижающей, в перспективе, негативное воздействие объекта захоронения ТКО на окружающую среду.

5. Анализ результатов прогнозирования совместного распространения в поверхностных водах загрязняющих веществ, выклинивающихся с фильтрационным потоком и сбрасываемых с поселковых очистных сооружений, позволяет предположить, что содержание аммонийного азота будет ниже ПДК уже на расстоянии 500 м от берега.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования в представленной диссертационной работе по разработке основ анализа и синтеза управления водными эмиссионными потоками объекта захоронения твердых коммунальных отходов с использованием системного подхода позволили получить следующие основные научные результаты:

1. Обоснована и разработана методика анализа процессов миграции загрязнений в подземных водах технической системы захоронения отходов.

2. Разработан вычислительный алгоритм решения задачи переноса загрязнений в подземном потоке от объекта утилизации отходов с использованием консервативной разностной схемы, позволяющей наиболее точно учитывать геометрию моделируемых объектов.

3. Установлены факторы, оказывающие существенное влияние на скорость продвижения фронта загрязнений, отражающие процессы трансформации вещества и учитываемые в модификации математической модели миграции веществ в подземных водах эмпирическими коэффициентами $k_1$ и $k_2$.

4. Модифицирована методика оценки экологического риска объекта утилизации отходов.

5. Разработана принципиальная схема системы управления водными эмиссионными потоками полигона ТКО, расположенного в водоохранной зоне поверхностного объекта гидросферы.

Таким образом, в диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача в области разработки методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации в соответствие с п.2: «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта» и п.7: «Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных

систем» паспорта научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки).

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БПК – биохимическое потребление кислорода;

ЗАТО – закрытое административное образование;

ПДК – предельно-допустимые концентрации;

ППВ – предельная полевая влагоемкость;

ППК – почвенно-поглощающий комплекс;

ПТО – природно-технические системы утилизации отходов;

ТБО – твердые бытовые отходы;

ТКО – твердые коммунальные отходы;

ХПК– химическое потребление кислорода.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван, А.В. Методологические проблемы исследований природных экологических и природно-технических систем/ А.В. Ван. – Текст: непосредственный //ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. – 2012. – №3. –Том 2. – С. 33–38.

2. Костарев, С.Н. Научно-методические решения идентификации и управления состоянием природно-технических систем утилизации отходов: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»: дис. … д-ра техн. наук:/ Костарев С.Н., ФГОУ ВПО «ПГТУ». – Пермь, 2010 – 382 с. – Текст: непосредственный.

3. Башкин, В.Н. Экологические риски: расчет, управление, страхование: учебное пособие / В.Н. Башкин. – М.: Высш. шк., 2007. – 360 с. – ISBN 978-5-06-005559-7. – Текст: непосредственный.

4. Образование, использование, обезвреживание и размещение отходов производства и потребления в Российской Федерации// Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. – URL: https://www.gks.ru/folder/11194 (дата обращения 20.12.2021). – Текст: электронный.

5. Директива №91/156/ЕЕК Совета Европейского Союза «Об отходах». – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. –Текст: электронный.

6. ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Этапы технологического цикла отходов. – Введ. 2015.01.01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 20 с. – Текст: непосредственный.

7. СП 320.1325800.2017. СВОД ПРАВИЛ. ПОЛИГОНЫ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. – Введ. 2018.05.18. – М.: Стандартинформ, 2018. – 8 с. – Текст: непосредственный.

8. Негуляева, Е. Ю. Оптимизация системы обращения с твердыми коммунальными отходами как фактор безопасности геоэкологической среды:

специальность 25.00.36 «Геоэкология»: диссертация … кандидата технических наук/ Негуляева Е.Ю., ГОУ ВПО "СПбГПУ". – Санкт-Петербург, 2005. – 151 с. – Текст: непосредственный.

9. Уланова, О.В. Комплексное устойчивое управление отходами. Жилищно-коммунальное хозяйство: учебное пособие/ О.В. Уланова, С.П., Салхофер, К. Вюнш. – М.: Издательский дом «Академия естествознания», 2017. – 446 с.– ISBN 978-5-91327-446-5. – Текст: непосредственный.

10. Системы управления бытовыми отходами разных стран: Рецепты для России//Институт экономики роста имени Столыпина И.П. http://stolypin.institute/wp-content/uploads/2019/10/sistemy-utilizatsii-othodov-raznyh-stran-25-09-2019.pdf (дата обращения 01.12. 2021). – Текст: электронный.

11. Мягченко, О. Мусорный рынок затарен. Депутаты Госдумы предлагают переложить полномочия по обращению с отходами с муниципалитетов на региональные власти // Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики. – URL: http://www.gks.ru (дата обращения 11.11.2021). –Текст: электронный.

12. Зайцева, Т.А. Полигон депонирования твердых бытовых отходов (ТБО) как антропогенная экологическая система/ Т.А. Зайцева // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т.3. – № 4. – С. 35–43. – Текст: непосредственный.

13. Распоряжение Правительства РФ №84-р от 25.01. 2018 «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. –Текст: электронный.

14. Директива № 1999/31/ЕС Совета Европейского Союза «По полигонам захоронения отходов». Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс. – Текст: электронный.

15. Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to

Directive 1999/31/EC (2003/33/EC) – URL: eurlex. europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ: L: 2003:011:0027:0049: EN:PDF (дата обращения: 30.07.2021). –Текст: электронный.

16. Слюсарь, Н.Н. Теория, методы и технологии обеспечения геоэкологической безопасности полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на постэксплуатационном периоде: специальность 25.00.36 «Геоэкология»: дис. … д-ра техн. наук/ Слюсарь Н. Н.; ПНИПУ. – Пермь, 2019. – 260 с. – Текст: непосредственный.

17. Российская Федерация. Законы. Об отходах производства и потребления: Федеральный закон № 89-ФЗ: [принят Государственной думой 22.05.1998 г.: одобрен Советом Федерации 10.06.1998 г. (ред. от 28.07.2012 с изм. и доп.). – М. Собрание законодательства РФ, 1998.– №26 ст. 3009.

18. Инструктивно-методические указания по взиманию платы за загрязнение окружающей природной среды: утв. Приказом Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ от 26.01.1993 (ред. от 15.02.2000 г. с изм. от 12.07.2011 г.:. зарег. в Минюсте РФ 24.03.1993 г. № 190). – М., 1993.

19. Пашкевич, М.А. Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду/ М.А. Пашкевич. – СПб: Санкт-Петербургский горный институт, 2000. – 230 с. – ISBN 5-94211-001-8. – Текст: непосредственный.

20. Гальперин, А.М. Техногенные массивы и охрана окружающей среды/ А.М. Гальперин, В. Фепстер, Х.Ю. Шеф. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2001. – 534 с. – ISBN 5-7418-0409-8. – Текст: непосредственный.

21. Щербина, Е.В. Научно-методологические основы геоэкологического проектирования полигонов твердых бытовых отходов: специальность 25.00.36 «Геоэкология»: дис. … д-ра техн. наук/ Щербина Е.В., МГСУ. – М., 2005. – 306 с. – Текст: непосредственный.

22. Laner, D. Understanding and evaluating long-term environmental risks from landfills: PhD Thesis/Laner D. – Vienna, 2011. – 243 p. – Текст: непосредственный.

23. Ашихмина, Т.В. Геоэкологический анализ состояния окружающей среды и природоохранные рекомендации в районе расположения полигонов ТБО Воронежской области: специальность 25.00.36 «Геоэкология»: дис… канд. технич. наук /Ашихимина Т.В., Воронеж. гос. техн. ун-т. – Воронеж, 2014. – 187 с. – Текст: непосредственный.

24. Федоров, П. М. Исследование и моделирование биохимических процессов, происходящих в полигонах твердых бытовых отходов / П. М. Федоров, Е. Ю. Негуляева, Е. Р. Покровская. – Текст: непосредственный// Комплексная переработка ТБО – наиболее передовая технология: сборник трудов РАН. – СПб.: СПбГТУ, 2001. – С. 62–72.

25. Федоров, П. М. Мониторинг геоэкологической системы «Полигон твердых бытовых отходов» на примере г. Санкт-Петербурга»: специальность 25.00.36 «Геоэкология»: дис. … канд. технич. наук. / Федоров П.М., Санкт-Петербург. гос. политехнич. ун-т. – С-Пб, 2005. – 121 с. – Текст: непосредственный.

26. Цинберг, М. Б. Образование метана на свалке твердых бытовых отходов г. Оренбурга / М. Б. Цинберг. – Текст: непосредственный // Чистый город. – 1998. – № 4. – С. 33–36.

27. Лобачева, Л.В. Моделирование процессов миграции загрязнений от свалки твердых бытовых отходов/ Л.В. Лобачева, Е.В. Борисова. – Текст: непосредственный// Компьютерные исследования и моделирование, 2020. – Т. 12. – № 2. – С. 369–385.

28. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review / P. Kjeldsen, M. Barlaz, A. Rooker [ и др.]– Текст: непосредственный //Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2002. – Vol. 32, №4. – P. 297–336.

29. О проблеме очистки фильтратов полигонов для захоронения твердых бытовых отходов / А. Ю. Бекетов, А.В. Бекренев, И.В. Викторовский [и др.]. – Текст: непосредственный // Экологическая химия. – 1998. – № 7. – С. 217–228.
30. Overall mapping of physical flows and stocks of resources to forecast waste quantities in Europe and identify life-cycle environmental stakes of waste prevention and recycling (FORWAST). – URL: http://forwast.brgm.fr (дата обращения: 06.07.2021). – Текст: электронный.
31. Berge, N.D. The Fate of Nitrogen in Bioreactor Landfills/ N.D Berge, D.R. Reinhart. – Текст: непосредственный //Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2005. – Vol. 35. – P. 365–399.
32. Barlaz, M. Methane production from municipal refuse/M. Barlaz, R Ham. – Текст: непосредственный// Critical reviews in environmental control. – 1990. – Vol. 19. – P.557–584.
33. Stegmann, R. Beschreibung eines Verfahrens zur Untersuchung anaerober Umsetzungsprozesse von festen Abfallstoffen im Labormaßstab/R. Stegmann. – Текст: непосредственный// Müll und Abfall. – 1981. – Vol. 2. – P. 35–39.
34. Öman, C. B. Chemical characterization of landfill leachates – 400 parameters and compounds/ // C. B Öman, C. Junestedt. – Текст: непосредственный// Waste Management. – 2008. – Vol. 28(10). –P.1876–1891.
35. Глушанкова, И.С. Очистка фильтрационных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов на различных этапах жизненного цикла: специальность 05.23.04. «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов»: дис. … д-ра техн. наук/Глушанкова И.С., ПГТУ. – Пермь, 2003. – 331 с. – Текст: непосредственный.
36. Aucott, M. The fate of heavy metals in landfills: A Review / M. Aucott. – New York: Academy of sciences, 2006. – 22 p. – Текст: непосредственный.
37. Злобина, В. Л. Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. Монография/В.Л. Злобина, Ю.А. Медовар, И.О. Юшманов. М.: Мир науки, 2017. – 191 с. – Текст: непосредственный.

38. Калинин, В. М. Экологический мониторинг природных сред/ В.М. Калинин, Н.Е. Рязанова. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 203 с.: ил., табл.; 22 см. – ISBN 978-5-16-010638-0. – Текст: непосредственный.

39. Снытко, В. А. Система экологического мониторинга в научном наследии академиков И. П. Герасимова и Ю. А. Израэля / В. А. Снытко, А. В. Собисевич. – Текст: непосредственный// Труды пятой международной научно-практической конференции "Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование", 30 ноября - 3 декабря 2017 года: сборник статей. 2017. С. 393–398.

40. Уайт, Г. География, ресурсы и окружающая среда = Geography Resources and Environment: избр. ст.: пер. с англ. / Г. Уайт. – М.: Прогресс, 1990. – 554 с.: ил.– ISBN 5-01-002051-5 (в пер.). – Текст: непосредственный.

41. Израэль, Ю. А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка окружающей природной среды. Основы мониторинга/Ю. А. Израэль. – Текст: непосредственный // Метеорология и гидрология. – 1974. - № 7. – С. 3–8.

42. Израэль, Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с. – Текст: непосредственный.

43. Израэль, Ю.А. Гидрометеорология и контроль состояния природной среды/Ю.А. Израэль. – Текст: непосредственный/ В кн.: Проблемы современной гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – С. 230–254.

44. Герасимов, И. П. Научные основы современного мониторинга окружающей среды / И. П. Герасимов. – Текст: непосредственный// - Известия АН СССР. Серия география. – 1975. – № 3. – С. 13–25.

45. ГОСТ Р 56060–2014. Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 4 с. – Текст: непосредственный.

46. Макаров, Р.Н. Программа производственного контроля для полигона ТБО/ Р.Н. Макаров. – Текст: электронный // Справочник эколога. 2015. № 2.

– URL: https://www.profiz.ru/eco/2_2015/PK_TBO/ (дата обращения 20. 09. 2021).
47. Матвеев, Ю.Н. Интеллектуальный мониторинг свалки твердых коммунальных отходов/ Ю.Н. Матвеев, Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный// Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сборник научных статей по итогам одиннадцатой международной научной конференции (Казань, 29-30 ноября 2020 года). – Москва: ООО «Конверт», 2020. – С. 115–117.
48. Лобачева, Л.В. Мониторинг свалок твердых коммунальных отходов с использованием программных систем моделирования распространения загрязнений в подземных водах/ Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный//Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник статей XXIV Международной научно-технической конференции (Пенза, 27-28 августа 2020 года). – Пенза: Пензенский ГАУ, 2020. – С. 74–77.
49. Рашевский, Н.М. Поддержка принятия решений в процессе мониторинга загрязнения атмосферного воздуха городских территорий: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»: дис. … канд. техн. наук:/ Рашевский Н.М., ФГОУ ВПО «ВГТУ». – Волгоград: 2019. – 144 с. – Текст: непосредственный.
50. Теличенко, В.И. Управление экологической безопасностью строительства. Экологический мониторинг: учебное пособие / В.И. Теличенко, М.Ю. Слесарев, В.Ф. Стойков. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2005. – 328 с. – ISBN: 5-93093-370-7. – Текст: непосредственный.
51. Белов, С.В. Охрана окружающей среды / С.В. Белов, Ф.А. Барбинов, А.Ф. Козьяков. – Москва: Высшая школа, 1991. – 319 с.: ил. – ISBN 5-06-000665-4. – Текст: непосредственный.

52. Садовникова, Н.П. Концептуальная модель процесса поддержки принятия решений в условиях неопределенности исходной информации на основе онтологического подхода/Н.П. Садовникова, Ю.С. Львова, Б.Х. Санжапов. – Текст: непосредственный// Открытое образование. – 2011. – №2 (88). – Ч.2.– С.185–187.

53. Садовникова, Н.П. Особенности выбора методов поддержки принятия решений в задачах обеспечения экологической безопасности развития городских территорий/Н.П. Садовникова, Ю.С. Львова, Е.П. Гнедкова. – Текст электронный.// Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительная информатика. − 2012. − № 7 (21). − 7 С. – Режим доступа: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SadovnikovaLvovaGnedkova−2012_7%2821%29.pdf.

54. Садовникова, Н.П. Экологическая безопасность города: поддержка принятия решений / Н.П. Садовникова**.** – М.: Спектр, 2013. – 164 с. – Текст: непосредственный.

55. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий /Т. Саати; пер. с англ. – М.: «Радио и связь», 1993. – 320 с. – ISBN 5-256-00443-3. –Текст: непосредственный.

56. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука / Р. Шеннон: пер. с англ.; под ред. Е.К. Масловского. – М.: Мир, 1978. – 418 с: ил. –Текст: непосредственный.

57. Математическое моделирование природных экосистем: учебное пособие/ В.И. Косов, Д.Ф. Шульгин, В.Е. Клыков., В.Н. Иванов. – Тверь: ТГТУ, 1998. – 255 с. –Текст: непосредственный.

58. Гринин, А.С. Математическое моделирование в экологии: учебное пособие/ А.С. Гринин, Н.А. Орехов, В.Н. Новиков. –М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 269 с. –Текст: непосредственный.

59. Эшби У.Р. Введение в кибернетику/ У.Р. Эшби: пер. с англ.; под ред. В.А. Успенского. – М.: Ленанд, 2015. – 432 с. – ISBN 978-5-9710-3702-6. –Текст: непосредственный.

60. Лаврик, В. И. Решение краевой задачи конвективной диффузии водорастворимых веществ с изменяющимся во времени граничным условием/В.И. Лаврик. – Текст: непосредственный //Дифференциальные уравнения с частными производными в прикладных задачах. – Киев: Ин – т математики АН УССР, 1982. – С. 68–69.
61. Хужаеров, Б.Х. Макроскопическое моделирование релаксационного переноса вещества в пористой среде/ Б.Х. Хужаеров. –Текст: непосредственный// Известия РАН, серия Механика жидкости и газа. – 2004. – №5. – С. 21–30.
62. Дворкин, Л.Б. К теории конвективной диффузии солей в пористых средах. Конвективная диффузия солей в пористых средах с учетом влияния “тупиковых” пор/ Л.Б. Дворкин. – Текст: непосредственный// Журнал физической химии. – 1968. – Т. 42, № 4.– С. 948 – 956.
63. Lindstrom F.T. A theory oh the mass transport of previonsly distributed chemicals in a water saturated sorbing porous medium: isothermal cases/ F.T. Lindstrom, L. Boersma, D. Stokard. – Текст: непосредственный//Soil Science. – 1971. – Vol. 112. – No 5. – P. 291–300.
64. Мошинский, А. И. Тепломассоперенос в пористом материале при учете релаксации потока массы/ А.И. Мошинский. – Текст: непосредственный. //Математическое моделирование. – 2015. – Том 27. – № 4. – С. 97 – 114.
65. Гамаюнов, Н.И. Процессы переноса энергии и вещества/ Н.И. Гамаюнов. – Тверь: ТГТУ, 2004. – 284 с. – Текст: непосредственный.
66. Чураев, Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах/ Н.В. Чураев. – М.: Химия, 1990. – 272 с. – Текст: непосредственный.
67. Иванов, В.Н. Процессы переноса и поглощения компонентов минеральных удобрений в торфе: специальность 05.15.05 «Технология и комплексная механизация торфяного производства»: дис. канд. тех. наук/Иванов В.Н., КПИ. – Калинин, 1984. – 250 с. – Текст: непосредственный.

68. Шульгин, Д.Ф., Вопросы динамики подземных вод и солей в почвогрунтах орошаемых земель (в связи с проблемой борьбы с засолением земель аридной зоны): автореф. дис. д-ра техн. наук/ Шульгин Д.Ф. – М., 1972. – Текст: непосредственный.
69. Rolston, Historical development of soilwater physics and solute transport in porous media/ D.E. Rolston– Текст: непосредственный// Water Sci Technol Water Supply. – 2007. –Vol. 7. – P. 59–66.
70. Математическое моделирование процессов распространения загрязняющего вещества в почвогрунтах и атмосфере при его аварийном разливе/ Ю.Н. Матвеев, Б.И. Масленников, К.А. Карельская. – Текст: электронный// Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Том 8, №5.– С 1–9. – Режим доступа https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-protsessov-rasprostraneniya-zagryaznyayuschego-veschestva-v-pochvogruntah-i-atmosfere-pri-ego (дата обращения 25.01.2020).
71. Lapidus L. Mathematics of adsorbtion in beads. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns/ L. Lapidus, N.R. Amudson. – Текст: непосредственный//J. Phys. Chem. – 1952. – Vol. 56, No 8. – P. 984–988.
72. Аравин, В.И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В.И. Аравин. – М.: Гостехиздат, 1954. – 616 с. – Текст: непосредственный.
73. Веригин, Н.Н. Некоторые вопросы химической гидродинамики, представляющие интерес для мелиорации и гидротехники/Н.Н. Веригин. – Текст: непосредственный// Известия АН СССР. Отделение техн. Наук. – 1953. – № 10.– С. 1369–1382.
74. Нумеров, С.Н. Диффузия растворимых веществ в основаниях гидротехнических сооружений/ С.Н. Нумеров, А.Н. Патрашев. – Текст: непосредственный // Труды ЛПИ. 1947. – №4. С. 165 – 169.
75. Веригин, Н. Н. К методике расчета растворения и выноса солей в основаниях гидротехнических сооружений/ Н.Н. Веригин, Б.С. Шержуков. –

Текст: непосредственный //Сборник трудов ВНИИГ. – Л, 1970.– Вып.48. – С.263–277.

76. Аверьянов, С.Ф. Некоторые вопросы предупреждения засоления орошаемых земель и меры борьбы с ним в Европейской части СССР/ С.Ф. Аверьянов. – Текст: непосредственный/ В кн.: Орошаемое земледелие в европейской части СССР. – М., 1965. – С. 90–151.

77. Шестаков, В.М. Динамика подземных вод/ В.М. Шестаков. – М.: МГУ, 1989. – 368 с. – Текст: непосредственный.

78. Бочевер, Ф.М. Защита подземных вод от загрязнения/ Ф.М. Бочевер, Н.Н. Лапшин, А.Е. Орадовская. – М: Недра, 1979. – 254 с. – Текст: непосредственный.

79. Бэр, Я. Физико-математические основы фильтрации воды/ Я., Бэр, Д. Заславский, С. Ирмей. – М: Мир, 1971. – 451с. – Текст: непосредственный.

80. Бондарев Конвективная диффузия в пористых средах с учетом явления адсорбции/ Э.Н. Бондарев, В.Н. Николаевский. – Текст: непосредственный// ПМТФ. – 1962. – №5. – С.127–134.

81. Лаврик, В. И. Решение краевых задач конвективной диффузии сорбирующихся примесей при двумерной фильтрации подземных вод/ В.И. Лаврик, И.В. Рогаль. – Текст: непосредственный // Нелинейные дифференциальные уравнения в прикладных задачах. – Киев: Ин – т математики АН УССР, 1984. – С. 114–118.

82. Лаврик, В. И. Некоторые математические модели и методы исследования процессов загрязнения подземных вод/ В.И. Лаврик, В.А. Добрынский, И.В. Рогаль. – Текст: непосредственный// Математика и проблемы водного хозяйства. – Киев: Наук. думка, 1986. – С. 100–122.

83. Пеньковский, В. И. Одномерная задача растворения вымыва солей при фильтрации с большим числом Пекле/ В.И. Пеньковский. – Текст: непосредственный // ПМТФ – 1969. – №2. – С.148–152.

84. Микайылов, Ф.Д. Прямые и обратные задачи модели солепереноса в условиях стационарного водно-солевого режима почвогрунтов/ Ф.Д.

Микайылов. – Текст: непосредственный/Пермский аграрный вестник. – 2014. – №3. – С. 52 – 59.

85. Mikailsoy, F. D. Concentration of Soluble Salts in Leached Soils İnferred from the Convective-Dispersive Equation/ F. D Mikailsoy, Y.A Pachepsky. – Текст: непосредственный // Irrigation Science. – 2010. – Vol. 28. No. 5. – P. 431–434.

86. Zhao, C. Numerical modeling of toxicnonaqueous-phase-liquid removal from contaminated groundwater systems: mesh effect and discretization error estimation/ C. Zhao, T. Poulet, K. Regenauer-Lieb. – Текст: непосредственный// International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2015. – Vol. 60. – P.1197 – 1210.

87. Беляев, А. Ю. Влияние гистерезиса сорбции на пространственное распределение загрязняющих веществ в грунте/ А.Ю.Беляев, И.О. Юшманов. – Текст: непосредственный // Изв. РАН. МЖГ. – 2008. – Т.6. С. 61–72.

88. Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах / С. П. Кундас, И. А. Гишкелюк, В. И. Коваленко, О. С. Хилько; под общ. ред. С. П. Кундаса. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011.– 212 с. – Текст: непосредственный.

89. Шеин, Е.В. Математическое моделирование в почвоведении. Учебник/ Е.В. Шеин, И.М. Рыжова. – М.: «ИП Маракушев А.Б.», 2016. – 67 с. – ISBN 978-5-9908895-0-7. – Текст: непосредственный.

90. Prosperetti A. Computational Methods for multiphase flow/ A. Prosperetti, G. Tryggvason. – Cambridge University Press, 2009. – 469 p. – Текст: непосредственный.

91. Wu, Y. S. Multiphase Fluid Flow in porous and fractured reservoirs/ Y. S. Wu – Gulf professional publishing, 2015. – 396 p. – Текст: непосредственный.

92. Конюхов, В. М. Фильтрационно-диффузионная модель миграции рассолов в неоднородных водоносных пластах/В.М. Конюхов, М.Г. Храмченков. – Текст: непосредственный//Изв. РАН. МЖГ. – 2004. – Т.2. – С. 140–151.

93. Battiato, I. Applicability regimes for macroscopic models of reactive transport in porous media/ I. Battiato, D. M. Tartakovsky. – Текст: непосредственный // J. Contam. Hydrol. – 2011. – vol. 120–121. – P. 18–26.
94. Сербина, Л.И. Асимптотический метод решения дробного уравнения миграции загрязнения подземных вод/ Л.И. Сербина, А.А. Вендина. – Текст: непосредственный// Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. - 2011. - Т.5. С. 104–108.
95. Соболева, Е.Б. Метод численного исследования динамики соленой воды в почве/ Е.Б. Соболева. – Текст: непосредственный// Матем. моделирование. – 2014. – Т. 26 (№2). С. 50–64.
96. Roubinet, D. Hybrid modeling of heterogeneous geochemical reactions in fractured porous media/ D. Roubinet, D.M. Tartakovsky. – Текст: непосредственный// J. Water Resources Research. – 2013.– Vol. 49 No 12. – P. 45–56.
97. Yousefzadeh, M. Physics-based hybrid method for multiscale transport in porous media/ M. Yousefzadeh, I Battiato. – Текст: непосредственный// Journal of Computational Physics. – 2017. – Vol. 344. – P. 320–338.
98. Molins, S. Multiscale approaches in reactive transport modeling/ S. Molins, P. Knabner. – Текст: непосредственный// J. Reviews in Mineralogy & Geochemistry. – 2019. – Vol. 85. – P. 27–48.
99. Молокова, Н. В. Решение геофильтрационных задач средствами математического моделирования/Н.В. Молокова. – Текст: непосредственный // Вестник СибГАУ. – Вып. 3 (20). – 2008. – С. 31–34.
100. Pore scale hydrodynamics in a progressively bioclogged three dimensional porous medium: 3D particle tracking experiments and stochastic transport modeling/ M. Cerrel., V. L. Morales, M. Dents [и др.]. – Текст: непосредственный // J. Water Resources Research. – 2018. – Vol. 54. – P. 83–98.
101. Клыков, В.Е. О решении некоторых обратных краевых задач подземной физико-химической гидродинамики/В.Е. Клыков, Д.Ф. Шульгин. – Текст:

непосредственный/В кн.: Исследования по специальным задачам гидродинамики. – М., 1982. – С. 45–51.

102. Шульгин, Д.Ф. Гидрохимические параметры математических моделей переноса питательных веществ в торфяных и дерновоподзолистых почвах/ Д.Ф. Шульгин, В.Н. Иванов, В.Е. Клыков. – Текст: непосредственный// Почвоведение. – 1987. – №3. – С. 27–34.

103. Шульгин, Д.Ф. Моделирование процессов миграции растворенных загрязняющих веществ в водоносных пластах: научное издание/Д.Ф. Шульгин, В.Е. Клыков, В.Н. Иванов. – Текст: непосредственный// Мелиоративное и водное хозяйство. – 1995. – № 2. – С. 25–27.

104. Емельнов, А.Г. Основы природопользования: учебник для студ. высш. учеб. заведений /А.Г. Емельнов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с. – ISBN 5-7695-3010-3. – Текст: непосредственный.

105. Месарович, М. Общая теория систем. Математические основы/М. Месарович, Я. Такахара. – М.: Мир, 1978. – 311 с.– Текст: непосредственный.

106. Костарев, С.Н., Середа, Т.Г., Клюкин, А.А., Файзрахманов, Р.А. Создание автоматизированной системы непрерывной информационной поддержки принятия решений при управлении безопасным состоянием объекта захоронения отходов /С.Н. Костарев, Т.Г. Середа, А.А., Клюкин, Р.А. Файзрахманов. – Текст: непосредственный // Промышленные АСУ и контроллеры . – 2012. –№ 11. – С. 1 – 5.

107. Кафаров, В.В. Основы массопередачи: учеб. пособие для вузов /В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1972. – 496 с. – Текст: непосредственный.

108. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств. / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов – М.: Высшая школа, 1991. 400 с. – ISBN 5-06402066. – Текст: непосредственный.

109. Моделирование систем /М.В. Аржаков, Н.В. Аржакова, В.К. Голиков [и др.]; под ред. В.И. Новосельцева. – Воронеж: Научная книга, 2005. – 216 с. – Текст: непосредственный.

110. Райбман, Н.С. Идентификация объектов управления (обзор) / Н.С. Райбман. – Текст: непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 6. – С. 80–93.
111. Цыпкин, Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1995. – 336 с. – Текст: непосредственный.
112. Современные методы идентификации систем: пер. с англ. / П. Эйкхофф, А. Ванечек, Е. Савараги [и др.]; под ред. П Эйкхоффа. – М.: Мир, 1984. – 400 с. – Текст: непосредственный.
113. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя/ Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 431 с. – Текст: непосредственный.
114. Логунов, П.Л. Использование информационных технологий и математических моделей в управлении производством / П.Л. Логунов, М.В. Шаманин. – Текст: непосредственный// Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2013. – № 7. – С. 28–30.
115. Чинакал, В.О. Применение интеллектуальных методов и моделирования в задачах анализа и прогноза состояния промышленных объектов / В.О. Чинакал– Текст: непосредственный// Труды 15-й Международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2015)». – 2015. – С. 74–77.
116. Технологии автоматизированного управления полигоном твердых бытовых отходов / Н.И. Артемов, Т.Г. Середа, С.Н. Костарев [и др.]. – Пермь: НИИ управляющих машин и систем, 2003. – 266 с. – Текст: непосредственный.
117. Середа, Т.Г. Наукоемкие технологии в проектировании искусственных экосистем хранения отходов / Т.Г. Середа, Р.А. Файзрахманов, С.Н. Костарев/Перм. филиал Института экономики УрО РАН; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – 289 с. – Текст: непосредственный.
118. Лиллепярг, Е.Р. Методика определения энергетического потенциала полигонов твердых бытовых отходов: специальность 05.14.08.

«Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии»: дис. … канд. техн. наук/ Лиллепярг Е.Р., ГОУ ВПО «СПбГПУ» – СПб., 2004. – 116 с. – Текст: непосредственный.

119. Barlaz, M. Mass balance analysis of anaerobically decomposed refuse/ M. Barlaz, R. Ham. – Текст: непосредственный// Journal of Environmental Engineering. – 1989. – Vol. 115, issue 6. – P. 1088– 1102.

120. Hjelmar, O. Sustainable landfill: the role of final storage quality/ O. Hjelmar, J.B. Hansen. – Текст: непосредственный//Proceedings of 10th International Waste Management and Landfill Symposium «Sardinia». – Forte Village, S. Maria di Pula (CA), Italy, 2005.

121. A cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China / C. Zhou, Z. Gong [и др.] – Текст: непосредственный // Waste Management. – 2015. – Vol. 35, № 1. – P. 191–198.

122. Рудакова, Л.В. Научно-методическое обоснование снижения эмиссии загрязняющих веществ полигонов захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) биотехнологическими методами: специальность 11.00.11 «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» дис. … д-ра техн. наук/ Рудакова Л.В., ПГУ. – Пермь, 2000. – 320 с. – Текст: непосредственный.

123. Моделирование влияния загрязнений подземных вод от полигона твердых бытовых отходов/ В.И. Косов, В.Е. Клыков, В.Н. Иванов [и др.]. – Текст: непосредственный// Экологические системы и приборы, 2000.– № 2. – С. 2 – 7.

124. Иванов, В.Н. Моделирование распространения загрязнений в подземном потоке от полигона твердых бытовых отходов/ В.Н. Иванов, Л.В. Лобачева, В.В. Кундряков. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012.– № 5. – С.183–187.

125. Закуленков, Л.Д. Озера острова Хачин/ Л.Д. Закуленков, А.А. Назаров. – Текст: непосредственный// Ученые записки Калининского пед. института, 1967, № 44, с. 85–98.

126. Дорофеев, А.А. География Тверской области/ АА Дорофеев, А.А. Ткаченко. – Тверь: ТГУ,1992. – 289 с. – ISBN 5-87302-010-8. – Текст: непосредственный.

127. Климентов, П.П. Методика гидрогеологических исследований /П.П. Климентов, В.М. Кононов. – М.: Высш. шк., 1989. – 448 с.– ISBN: 5-06-000080-X. – Текст: непосредственный.

128. ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации сухого и прокаленного остатка в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом. – М., 2015. –11 с. – Текст: непосредственный.

129. Алесковский, В.Б. Физико-химические методы анализа. / В.Б. Алесковский, В.В. Бардин, Е.С. Бойчинова. – Л.: Химия, 1988. – 376 с. – ISBN: 5-7245-0013-2. –Текст: непосредственный.

130. Дубова, Н.М. Титриметрические методы анализа: учебно-методическое пособие. / Н.М. Дубова, Т.М. Гиндуллина. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. –100 с. – Текст: непосредственный.

131. Косов, В.И. Гидроэкология/ В.И. Косов, В.Н. Иванов, Р.В. Сухарукова. – Тверь: ТГТУ. 2000. – 320 с. – Текст: непосредственный.

132. Косов, В.И. Охрана и рациональное использование водных ресурсов. Тверь: ТГТУ. Ч.1. Охрана подземных вод/ В.И. Косов, В.Н. Иванов. Тверь: ТГТУ. 2000. – 186 с. – Текст: непосредственный.

133. Матвеев, Ю.Н. Алгоритм определения гидрохимических параметров математических моделей миграции загрязнений/ Ю.Н. Матвеев, В.Н. Иванов, Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный//Научно-технический вестник Поволжья, 2019. №10. С. 10–12.

134. Иванов, В.Н. Технология отбора почвенных монолитов для лизиметрических установок/ В.Н. Иванов – Текст: непосредственный/Саморазвивающаяся среда технического университета: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – 2018. – Ч.1. – С. 66-70.

135. Айдаров, И.П. Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель/ И.П. Айдаров. – М.: Агропромиздат. 1985. – 304 с. – Текст: непосредственный.

136. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году: государственный доклад. – URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2017_/ (дата обращения: 25.11.2021). – Текст: электронный.

137. Грибанова, Л. П. Контроль подземных и поверхностных вод в районах полигонов твердых бытовых отходов Московского региона/ Л.П. Грибанова, Т.Г. Портнова. – Текст: непосредственный // Экологический вестник Подмосковья. – 1993. – Вып. 4. – С. 27–29.

138. Витковская, С.Е. Оценка потенциальной опасности фильтрационных вод полигонов твердых коммунальных отходов Ленинградской области/ С.Е. Витковская, Ю.О. Шилова, Д.М. Малюхин. – Текст: непосредственный// Агрофизика. – 2019. – №1. С. 1 – 7.

139. Самарский А.А. Теория разностных схем/ А.А. Самарский. – М.: Наука. 1983. – 616 с. – Текст: непосредственный.

140. Годунов, С.К. Разностные схемы: учебное пособие / С.К. Годунов, В.С. Рябенький. – М.: Наука, 1977. – 440 с. – Текст: непосредственный.

141. Косов, В. И Теоретические основы экологии и рационального природопользования/ В.И. Косов, Д.Ф. Шульгин. – Тверь: ТГТУ, 1994. – 174 с. – Текст: непосредственный.

141. Константинов, И.С. Особенности построения и интеллектуализация системы экомониторинга в составе автоматизированной системы управления экологической безопасностью / И.С. Константинов, О.Д. Иващук. – Текст: непосредственный // Информационные системы и технологии. – 2010. – № 6(62) ноябрь-декабрь. – С. 113 – 118.

142. Матвеев, Ю. Н. Системологические основы организации мониторинга состояния свалок твердых коммунальных отходов/ Ю.Н. Матвеев, Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный// Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – №12. – С. 60–62.
143. Рябов Ю.В. Разработка универсальной методики расчёта экологического риска возникновения пожара на несанкционированных свалках. Текст: электронный– URL: gis-lab.info/projects/geokonkurs2011/results/ryabov_dumps_2nd.pdf (дата обращения: 24.11.2021). – Загл. с экрана.
144. Применение методологии управления рисками для объектов городской инфраструктуры на примере полигонов ТБО /В.В. Карманов, Г.С. Арзамасова, И.В. Новикова [и др.]. – Текст: непосредственный// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2011. – № 2. – С. 15–28.
145. Слюсарь, Н.Н. Использование результатов оценки экологического риска для разработки программ вывода из эксплуатации старых свалок/Н.Н. Слюсарь. – Текст: непосредственный// Вестник МГСУ. – 2016. – № 8. – С. 88–99.
146. Матвеев, Ю.Н. К вопросу оценки экологического риска технических систем утилизации отходов/ Ю.Н. Матвеев, Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. –№9. – С. 47–49.
147. Лобачева, Л.В. Оценка экологического риска объекта утилизации твердых коммунальных отходов/ Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный //Экология и безопасность жизнедеятельности. Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лукшина (Пенза, 13-14 декабря 2022 года). – Пенза: Пензенский ГАУ. – 2022. – С. 215 – 218.
148. Вайсман, Я.И. Управление водным балансом полигона ТБО на примере полигона в г. Краснокамске/ Я.И. Вайсман, С.Ю. Чудинов, Д.С. Кравченко. –

Текст: непосредственный // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2012. – № 1. – С. 43 – 57.

149. Управление отходами. Полигоны захоронения твердых бытовых отходов/ Я.И. Вайсман, Коротаев, В.Ю. Петров [и др.]. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2007. – 464 с. – Текст: непосредственный.

150. Беспалов В.И. Анализ условий образования фильтрата на полигонах по захоронению твердых отходов потребления. – Текст: электронный. – URL: http://www.rusnauka.com/18_ADEN_2013/Tecnic/13_139660.doc.htm (дата обращения: 24.04.2021). – Загл. с экрана.

151. Клюкин, А.А. Обоснование автоматизированной системы управления состоянием объектов захоронения отходов/ А.А. Клюкин. – Текст: электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 216. Режим доступа: https://science-education.ru/ru/issue/view?id=102 (дата обращения 29.05.2021). – Загл. с экрана.

152. Матвеев, Ю.Н. Основные аспекты управления водными эмиссионными потоками объекта захоронения твердых коммунальных отходов/ Ю.Н. Матвеев, Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – №6. – С. 53–55.

153. Лобачева, Л.В. Проблема экологической безопасности полигона твердых бытовых отходов/ Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный // Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией Т.Б. Новиченковой. – Тверь: ТвГТУ. – 2020. – С. 63–66.

154. Лобачева, Л.В. Проблема влияния свалок твердых коммунальных отходов на состояние водных объектов/ Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный //Глобальные региональные аспекты устойчивого развития. Современные реалии. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (Грозный, 23-24 октября 2020 года). – Грозный: ЧГУ им. А.А. Кадырова. – 2020. – С. 121–123.

155. Лобачева, Л.В. Применение управленческих решений на полигоне твердых коммунальных отходов/ Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный //Актуальные исследования в современном мире. – 2021. – № 12-11(80). – С. 95–97.

156. Лобачева, Л.В. Применение управленческих решений на объектах захоронения твердых коммунальных отходов/ Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный //Инновационные решения социальных, экономических и технологических проблем современного общества. Сборник научных статей по итогам круглого стола со всероссийским и международным участием (Москва, 15-16 декабря 2021 года). – Москва: ООО «Конверт». – 2021. – С. 102–103.

157. Лобачева, Л.В. Основные подходы к реализации управленческих решений в сфере экологической безопасности объектов захоронения твердых коммунальных отходов/ Л.В. Лобачева. – Текст: непосредственный //Экология и безопасность жизнедеятельности. Сборник статей XXI Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лукшина (Пенза, 13-14 декабря 2021 года). – Пенза: Пензенский ГАУ. – 2021. – С. 121–124.

158. Ахмедова, Н.Р. Защита грунтовых вод от загрязнения инфильтратом свалок в Калининградской области: специальность 03.02.08 «Экология» автореф. дис. канд. тех. Наук/ Ахмедова Н.Р., ФГОУ ВПО «КГТУ». – Калининград, 2010. – 22 с.

159. Первов, А.Г. Экономические аспекты очистки фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов с применением мембран/А.Г. Первов, Т.Н. Ширкова, Д.В. Спицин. – Текст: непосредственный // Вестник МГСУ. – 2021. –Т.16., Вып. 6. – С. 698–719.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производственном процессе ООО «ЭКОМАШГРУПП»

Утверждаю:

Генеральный директор

ООО «ЭКОМАШГРУПП»

_____ А.М. Пугин

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы

Лобачевой Людмилы Владимировны в производственный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Лобачевой Людмилы Владимировны на тему «Системный анализ и управление водными эмиссионными потоками объекта захоронения твердых коммунальных отходов» в части

– методик комплексного мониторинга при проектировании и эксплуатации полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО), в части повышения точности математических методов обработки информации;

– рекомендаций по управлению процессами сбора, отвода и рециркуляции фильтрата полигона ТКО, в части оптимизации экологического риска природно-технической системы;

– алгоритмов расчета, позволяющих обрабатывать информацию в части исследования проектов и выборе режима эксплуатации существующих полигонов ТКО внедрены и используются на предприятии ООО НПО «ЭКОМАШГРУПП» при проектировании, реконструкции, расширении полигонов ТКО.

Работы проводились на предприятии в сезонах 2020 и 2021 гг.

Технический директор А.А. Петров

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Заключение на диссертацию ООО «Проектно-конструкторское бюро автоматизации производств»

Общество с ограниченной ответственностью

**«Проектно-конструкторское бюро автоматизации производств»**

(ООО «ПКБАП»)

Российская Федерация
170008, г. Тверь,
ул. Ротмистрова, д. 27
корп. 1

тел. (4822) 41-53-38
E-mail: **pkbap@mail.ru**
**www.pkbap.ru**

**УТВЕРЖДАЮ**
Директор «ПКБ АП»
---------- В.М.Кожемякин
«07» июня 2022 г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

об алгоритме прогнозирования состояния технической системы утилизации отходов, предложенный в диссертационной работы Лобачевой Людмилы Владимировны «Системный анализ и управление водными эмиссионными потоками объекта захоронения твердых коммунальных отходов» и представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Комиссия в составе:

Председатель: главный инженер Викторов В.М.,

Члены комиссии: главный конструктор Садиков М.И.,

составила настоящее заключение, что научные результаты диссертационной работы Лобачевой Людмилы Владимировны, полученные при использовании разработанного программного продукта, обеспечивают уменьшение ошибки прогнозирования состояния объекта захоронения твердых коммунальных отходов и могут быть рекомендованы для оптимизации схем размещения, расширения и вывода из эксплуатации технических систем захоронения отходов.

Использование предлагаемых методов и алгоритмов позволит повысить эффективность управления рисками в технических системах захоронения отходов, а часть результатов может быть передана для промышленного внедрения на других объектах.

Председатель ----------В.М.Викторов

Члены комиссии ----------М.И.Садиков

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебном процессе кафедры ГДПЭ ТвГТУ

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«Тверской государственный технический университет»**
**(ТвГТУ)**
Наб. А.Никитина, д.22, г.Тверь, 170026
Тел. (4822) 78-63-35, факс (4822) 52-62-92
E-mail: common@tstu.tver.ru
http://www.tstu.tver.ru
ОКПО 02068284, ОГРН 1026900533747,
ИНН/КПП 6902010135 / 695201001

№ 19.07.2022г 98-11-999 нх
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор
по учебной работе ТвГТУ
д. филосов. н. Майкова Э.Ю.
«14» _____2022 г.

Акт
о внедрении результатов диссертационной работы
Лобачевой Людмилы Владимировны в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы на тему «Системный анализ и управление водными эмиссионными потоками объекта захоронения твердых коммунальных отходов» в части методики проведения лабораторных работ по дисциплине «Химия окружающей среды» и практических работ по дисциплине «Экологический риск» для направления подготовки бакалавриата 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии внедрены на кафедре «Горное дело, природообустройство» и промышленная экология».

Заведующий кафедрой ГДПЭ О.С. Мисников

к т. н. доц. кафедры ГДПЭ В.Н. Иванов