



ЛОБАЧЕВА ЛЮДМИЛА ВЛАДИМИРОВНА

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ
ЭМИССИОННЫМИ ПОТОКАМИ ОБЪЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата

технических наук

ТВЕРЬ – 2023

Работа выполнена на кафедре электронных вычислительных машин ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТвГТУ»)

Научный руководитель: Матвеев Юрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Электронные вычислительные
машины» ТвГТУ

Официальные оппоненты: Попов Николай Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Природопользование и защита
окружающей среды» ФГБОУ ВО «Тамбовский
государственный технический университет»,
г. Тамбов

Волков Владислав Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Менеджмент»
Новомосковского института (филиала) ФГБОУ
ВО «Российский химико-технологический
университет им. Д.И. Менделеева»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Тульский государственный
университет», г. Тула

Защита состоится <<26>> сентября 2023 г. в <<14>> часов 00 минут на
заседании диссертационного совета 24.2.410.01 в ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет» по адресу: 170026, г. Тверь,
наб. Аф. Никитина, д. 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тверского
государственного технического университета и на сайте www.tstu.tver.ru

Автореферат разослан “_____” _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.410.01
доктор физико-математических наук,
профессор

С.М. Дзюба

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из серьезнейших вызовов современности, связанных с обеспечением экологической устойчивости территории, является проблема образования и использования твердых коммунальных отходов. В результате жизнедеятельности человека в почве городских поселений накапливаются различные органические и неорганические вещества, биологически активные компоненты. Основными источниками органических загрязнений являются бытовые отходы. В настоящее время наиболее распространенным способом утилизации отходов является их депонирование на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО). Стремительная глобализация, рост урбанизации и численности населения, привело к увеличению количества образующихся коммунальных отходов, которые складываются на свалках и полигонах ТКО по всему миру. Поэтому снижение негативного влияния полигонов ТКО является одной из актуальных и нерешенных проблем современных урбанизированных территорий. В настоящее время на территории РФ более 50% действующих объектов утилизации выработали нормативный срок эксплуатации и расположены в водоохранной зоне водных объектов.

Невозможность единовременного и быстрого вывода из системы обращения с отходами «старых» свалок и полигонов требует проведения оценки текущего состояния объекта, результаты которой используются для составления прогнозных расчетов и разработки решений по управлению объектом захоронения отходов с целью минимизации экологического риска.

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. Середя, 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, В.Д. Горячева, 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. Бочеве, Я. Бэр, Э.Н. Бондарева, В.Н. Николаевского, В.Н. Лаврика, В.И. Пеньковского, Ф.Д. Михайлова, Л.И. Сербиной, С. 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, Р. 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.

Цели и задачи.

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

Для достижения 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.

Научная новизна работы.

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.

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.

Научные 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.

Достоверность научных положений подтверждается корректной постановкой задач исследований, обоснованным использованием теории и практики физической химии, 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.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы переданы для использования в проектах предприятий ООО «ЭКОМАШГРУПП» и ООО «Проектно-конструкторское бюро автоматизации производств», а также внедрены в учебный процесс Тверского государственного технического университета в качестве методики проведения лабораторных и практических работ для студентов специальности 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.

Апробация работы. Научные положения и практические результаты диссертационной работы в целом и по отдельным разделам 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. 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, 18 таблиц и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности исследования в области прогнозирования и управления природно-техническими системами утилизации отходов, сформулированы объект и предмет исследования, поставлены цель и задачи, приведена научная новизна и практическая значимость работы, перечень публикаций по теме диссертации, объем и краткое содержание работы.

В **первой главе** проводился анализ воздействия объектов утилизации отходов на окружающую природную среду. Обосновано, что 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, каждый из которых включает в себя два массива элементов: экологические (природные) и технические, которые объединены технологическими, техническими и информационными связями, обеспечивающие принятие решений по управлению объектами утилизации отходов и снижению экологического риска.

Показано, что основные экологические риски «старых свалок», не оборудованных инженерными системами защиты от загрязнений, связаны с проникновением фильтрата в подземные и поверхностные воды. При анализе специфики мониторинга «старых» свалок, отмечено, что поскольку ведущим фактором их воздействия на окружающую среду является фильтрат, то при комплексных наблюдениях и управлении такими объектами основное внимание должно уделяться мониторингу подземных вод.

В работе представлена схема водного баланса полигона ТКО в виде полузакрытой системы входящих и выходящих водных эмиссионных потоков, формирующихся под воздействием внутренних и внешних параметров (рисунок 1).

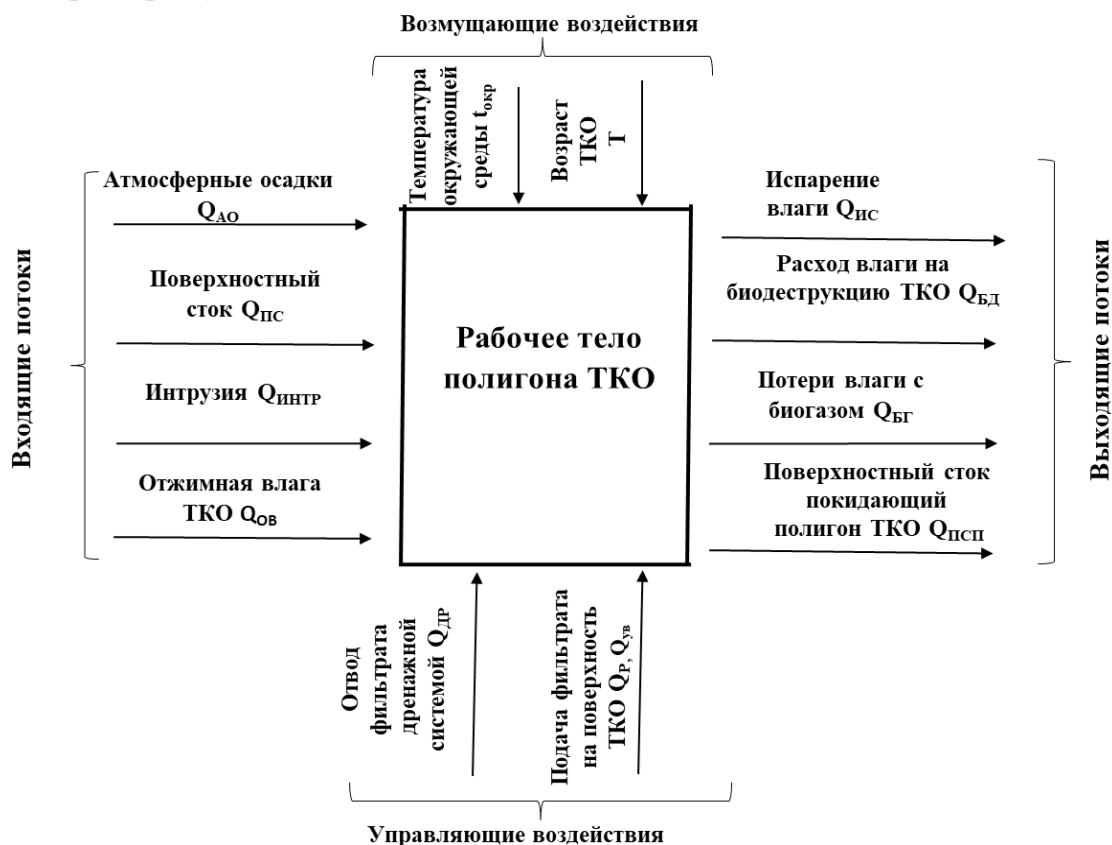


Рисунок 1 – Схема водного баланса объекта депонирования ТКО

Уравнение водного баланса будет иметь вид (1):

$$(Q_{АО} + Q_{ОВ} + Q_{ПС} + Q_{ИНТР}) = (Q_{ПСП} + Q_{БГ} + Q_{БД} + Q_{ИС} + Q_{ПР}), \quad (1)$$

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.

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 $\min V_{\phi}$ при следующих условиях.

$$V_{\phi} = (Q_{АО} + Q_{ОВ}) - (Q_{ПС} + Q_{ИС} + Q_{БГ} + Q_{БД}) \longrightarrow \min \quad (2)$$

или

$$V_{\phi} = Q_{АО} - (Q_{ИС} + Q_{ПС}) \longrightarrow \min \quad (3)$$

где:

V_{ϕ} – объем, образующихся в теле свалки фильтрационных вод.

Определение $\min V_{\phi}$ является основой для работ с водными эмиссионными потоками объекта захоронения отходов.

Во второй главе для изучения процессов, протекающих на объекте депонирования отходов, был выполнен анализ информационных данных по исследуемой проблеме и проведена серия экспериментов, для уточнения параметров, структуры модели полигона ТКО. Исследование водно-эмиссионным процессов проводилось на полигоне ТКО, расположенного на территории градообразующего предприятия в водоохраной зоне озера Селигер. В ближайшие годы консервация полигона ТКО не планируется. Анализ гидрогеологических условий объекта показал, что разгрузка грунтовых вод под свалкой происходит в озеро Селигер.

Для получения данных о текущем загрязнении природно-технической системы и определения значений, необходимых для оценки эмиссии веществ были проведены полевые исследования, в ходе которых были отобраны монолиты грунта, пробы воды. В качестве ведущих веществ в исследовании миграции загрязнений полигона ТКО были выбраны аммонийный азот и нитратный азот, поскольку их концентрация в отобранных пробах воды в несколько раз превышает нормативные значения.

Для прогноза продвижения загрязнений в водоносных пластах и количественной оценки процесса взаимодействия загрязненных вод с природными подземными водами с помощью математических моделей установлены гидродинамические параметры пласта. Для определения параметров миграции загрязнений в подземных водах была проведена серия экспериментов, которые выполнялись на установке конструкции ТвГТУ. В результате, используя полученные данные, с помощью программного продукта OWR-26 определялись значения активной пористости n_a и параметра гидродисперсии λ , а с помощью программного продукта ALPNA определялись значения коэффициента скорости сорбционного обмена β и коэффициента распределения иона между поровым раствором и почвенно-поглощающим комплексом (ППК) α . В результате получены осредненные значения параметров миграции загрязнений (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты расчетов гидрохимических параметров переноса несорбирующихся и сорбирующихся ингредиентов

n_a	λ , м	β , м ⁻¹	α
0,586	0,645	72,6	0,826
v , м/сут	k_1	k_2	$D_{M1,M2}$, м ² /сут
0,0014	0,0001 сут ⁻¹	0,0001 сут ⁻¹	$1,0 \cdot 10^{-5}$

В третьей главе описывается алгоритм прогнозирования распространения загрязнений от объекта утилизации отходов в подземных и поверхностных водах (рисунок 2). Для прогноза горизонтального переноса ингредиентов в направлении фильтрационного потока была использована двумерная математическая модель процесса переноса солей фильтрационным потоком в почве (4).

$$\begin{cases} n_a \frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial t} + k_1 C_2 - k_2 C_1, \\ \frac{\partial N_1}{\partial t} = -\beta(\alpha N_1 - n_a C_1), \\ n_a \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_2}{\partial x} - k_1 C_2. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь введены следующие обозначения: C_1 – концентрация ионов NH_4^+ поровом растворе, мг/л; C_2 – концентрация ионов NO_3^- в поровом растворе, мг/л; N_1 – количество ионов NH_4^+ , сорбированное твердой фазой

почвогрунта, г/м³; x – горизонтальная координата, м; $D_1 = D_{M1} + \lambda_1|v|$ – коэффициент конвективной диффузии ионов NH_4^+ , м²/сут; $D_2 = D_{M2} + \lambda_2|v|$ – коэффициент конвективной диффузии ионов NO_3^- , м²/сут; D_{M1} , D_{M2} – коэффициенты молекулярной диффузии соответствующих ионов, м²/сут; λ_1 , λ_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.

Распространение загрязняющих веществ по вертикали вглубь почвогрунтовой толщи описывается системой уравнений (5), учитывающей процессы трансформации вещества за счет включения в модель коэффициента k_1 .

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

$$\begin{cases} n_a \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_{M1} \frac{\partial^2 C_1}{\partial z^2} - \frac{\partial N_1}{\partial t} + K_1 C_2 \\ \frac{\partial N_1}{\partial t} = -\beta(\alpha N_1 - n_a C_1) \\ n_a \frac{\partial C_2}{\partial t} = D_{M2} \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} - K_1 C_2 \end{cases} \quad (5)$$

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

Начальные условия системы уравнений (4):

$$t = 0: C_1(x, 0) = C_{10}(x), C_2(x, 0) = C_{20}(x), N_1(x, 0) = C_{10}(x) \cdot n_a / \alpha, \quad (6)$$

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 (4): 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:

$$t > 0 \begin{cases} x = 0: [C_1(0, t) - C_{n1}] \cdot v = D_1 [\partial C_1(0, t) / \partial x], \\ [C_2(0, t) - C_{n2}] \cdot v = D_2 [\partial C_2(0, t) / \partial x], \\ x = L: \partial C_1(L, t) / \partial x = 0, \partial C_2(L, t) / \partial x = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где C_{n1} , – концентрация ионов NH_4^+ в 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.

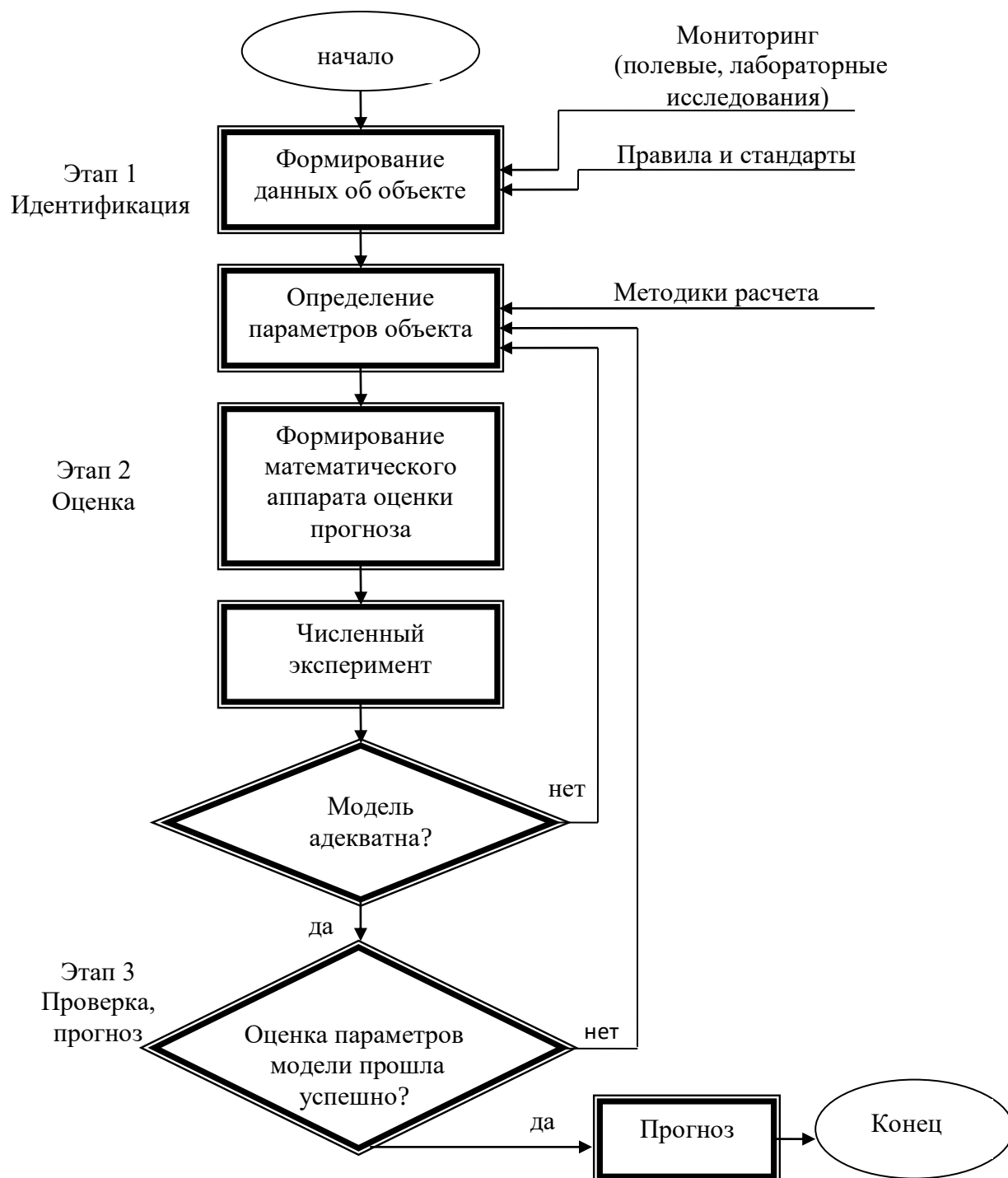


Рисунок 2 – Алгоритм прогнозирования миграции загрязнений от объекта утилизации ТКО

При проведении расчетов за начальный момент времени ($t=0$) принят момент начала функционирования свалки ТКО. 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 (5):

$$t = 0: C_1(z, 0) = C_{10}(z), C_2(z, 0) = C_{20}(z), N_1(z, 0) = C_{10}(z) \cdot n_a/\alpha, \quad (8)$$

Граничные условия системы уравнений (5): 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:

$$t > 0 \begin{cases} z = 0: C_1(0, t) = C_{n_1}; C_2(0, t) = C_{n_2}, \\ z = L: \partial C_1(L, t)/\partial z = 0, \partial C_2(L, t)/\partial z = 0. \end{cases} \quad (9)$$

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

Численное решение приведенных выше краевых задач осуществлялось с использованием консервативной конечно-разностной схемы. Разработан моделирующий компьютерный комплекс, позволяющий проводить расчет распространения загрязнений в грунтовых водах при конкретных значениях исходных данных.

Аналитическое решение задачи выполнено для случая горизонтальной миграции загрязнений от полигона ТКО, поскольку такая эмиссия вызывает риск загрязнения как подземных, так и поверхностных вод. Точное решение задачи миграции (4) в условиях (6) – (7) получено с помощью интегрального преобразования Лапласа в виде

$$\bar{C}(x, t) = \frac{C(x, t) - C_0}{C_n - C_0} = \frac{\operatorname{erfc}\varphi_4}{2(C_n - C_0)} \left(C_n e^{\frac{-\gamma' \cdot x}{v'}} - C_0 e^{-\gamma' \cdot t} \right) - \frac{C_0}{C_n} (1 - e^{-\gamma' \cdot t}) \quad (10)$$

где $\bar{C}(x, t)$, $C(x, t)$, C_0 , C_n – 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_a – эффективная пористость грунта, n_a – активная пористость грунта

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

$$\operatorname{erfc}\eta = 1 - \eta; \operatorname{erfc}\eta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-u^2} du$$

– интеграл вероятности, причем

$\operatorname{erfc}(-\eta) = 2 - \operatorname{erfc}\eta$; $\operatorname{erfc}(-\eta) = \operatorname{erfc}(\eta)$; $\operatorname{erfc}\eta$ – табулированная функция.

Для прогноза миграции загрязнений от полигона ТКО в начале, с использованием соответствующей математической модели (5) при условиях (8)–(9) рассчитано распространение ингредиентов (аммонийного и нитратного азота) по вертикали вглубь почвогрунтовой толщи. Оценка распространения загрязнений вглубь почвогрунтовой толщи на период длительностью до 100 лет, позволила установить характер распределения ионов NH_4^+ и NO_3^- по глубине и выяснить зависимость приведенной глубины

миграции рассматриваемых веществ от времени функционирования полигона.

Для прогноза горизонтального распространения аммонийного азота также выполнен вычислительный эксперимент и получено аналитическое решение задачи. Сделан сравнительный анализ модельных результатов с данными полевых и лабораторных исследований полигона ТКО.

В результате исследований получено, что концентрация нитратного азота на всем протяжении исследуемого фильтрационного потока значительно меньше нормативных значений, поэтому для прогнозных расчетов в дальнейшем будут анализироваться данные только для аммонийного азота. Прогнозирование горизонтальной 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). В результате анализа данных прогнозных расчетов на период времени 50 лет от начала эксплуатации полигона ТКО, было установлено, что на кривых, характеризующих миграцию аммонийного азота в почвогрунтовой толще (рисунок 3), 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).

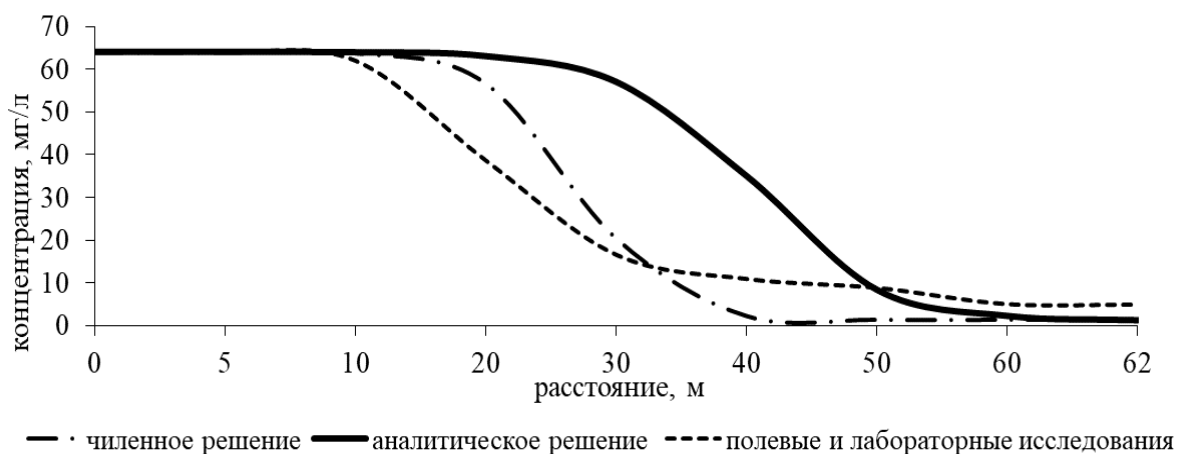


Рисунок 3 – Результаты полевых исследований и прогнозных расчетов миграции аммония на территории полигона ТКО через 50 лет

Результаты моделирования горизонтального переноса аммонийного азота на период времени 75 лет (рисунок 4), что примерно соответствует прогнозу загрязнения подземных вод в настоящий период времени, позволяет – сделать вывод о том, что на расстоянии примерно 20 м (при численном решении) и 30 м (при аналитическом решении) можно выделить зону

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

На основании численного моделирования и аналитического решения задачи миграции аммонийного азота можно сделать вывод о том, что через 100 лет с момента существования объекта исследования ионы аммония практически полностью заполняют поровое пространство между свалкой и озером.

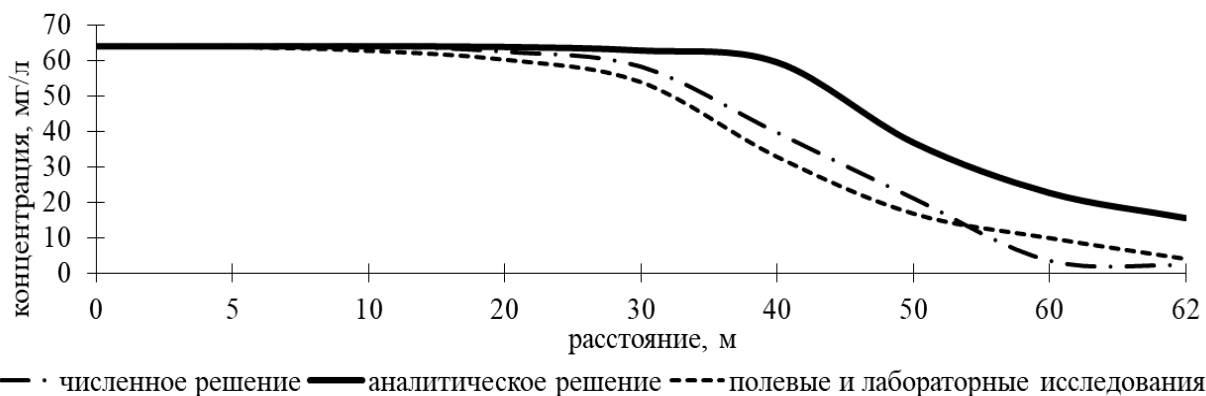


Рисунок 4 – Результаты прогнозных расчетов миграции аммония на территории полигона ТКО через 75 лет (настоящее время)

Для оценки влияния полигона ТКО на поверхностные воды, в работе выполнен прогноз распространения проникающих в озеро Селигер загрязненных фильтрационных вод.

Для определения параметров распространения веществ в водоеме был применен эмпирический метод М.А. Руффеля, полученный по результатам натурных наблюдений за разбавлением сточных вод в озере Селигер. Для прогнозирования загрязнения вод озера Селигер по результатам математического моделирования с помощью компьютерного комплекса KS-PR, разработанного в ТвГТУ определены значения концентраций NH_4^+ в фильтрационном потоке, поступающем в озеро со стороны объекта утилизации ТКО. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что ионы аммония начинают поступать в озеро примерно после 35 лет от момента начала эксплуатации полигона.

Четвертая глава посвящена определению экологического риска объекта утилизации отходов, разработке модели эффективного мониторинга и управления процессами в природно-технических системах депонирования отходов. На основании результатов полевых и лабораторных исследований определены основные функции системы мониторинга территории объекта и предложена структура интеллектуальной системы мониторинга полигона ТКО. Поскольку исследуемый полигон ТКО 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.

Для определения экологического риска объекта утилизации отходов пос. Солнечный используется метод, основанный на комплексной оценке экологического риска природно-технических систем депонирования отходов по группам критериев (рисунок 5).



Рисунок 5 – Алгоритм анализа экологического риска полигона ТКО

Существующий подход оценки риска был дополнен параметрами, учитывающими оснащённость территории объекта наблюдательными пунктами контроля загрязнений и его расположение относительно населенного пункта. Согласно методике, каждая группа критериев ранжируется с определением весовых коэффициентов, что позволяет из всего множества критериев выбрать те, которые являются ведущими в анализе риска. В результате на основании критериев ранжирования объектов получено, что полигон ТКО соответствует потенциально опасным, представляющим угрозу для здоровья населения и окружающей природной среды природно-техническим системам.

С целью снижения экологического риска исследуемого объекта утилизации отходов, обоснованы решения по управлению элементами гидросферы изучаемой территории. В результате для полигона ТКО пос. Солнечный разработана схема сбора, отвода и рециркуляции фильтрата (рисунок 6).

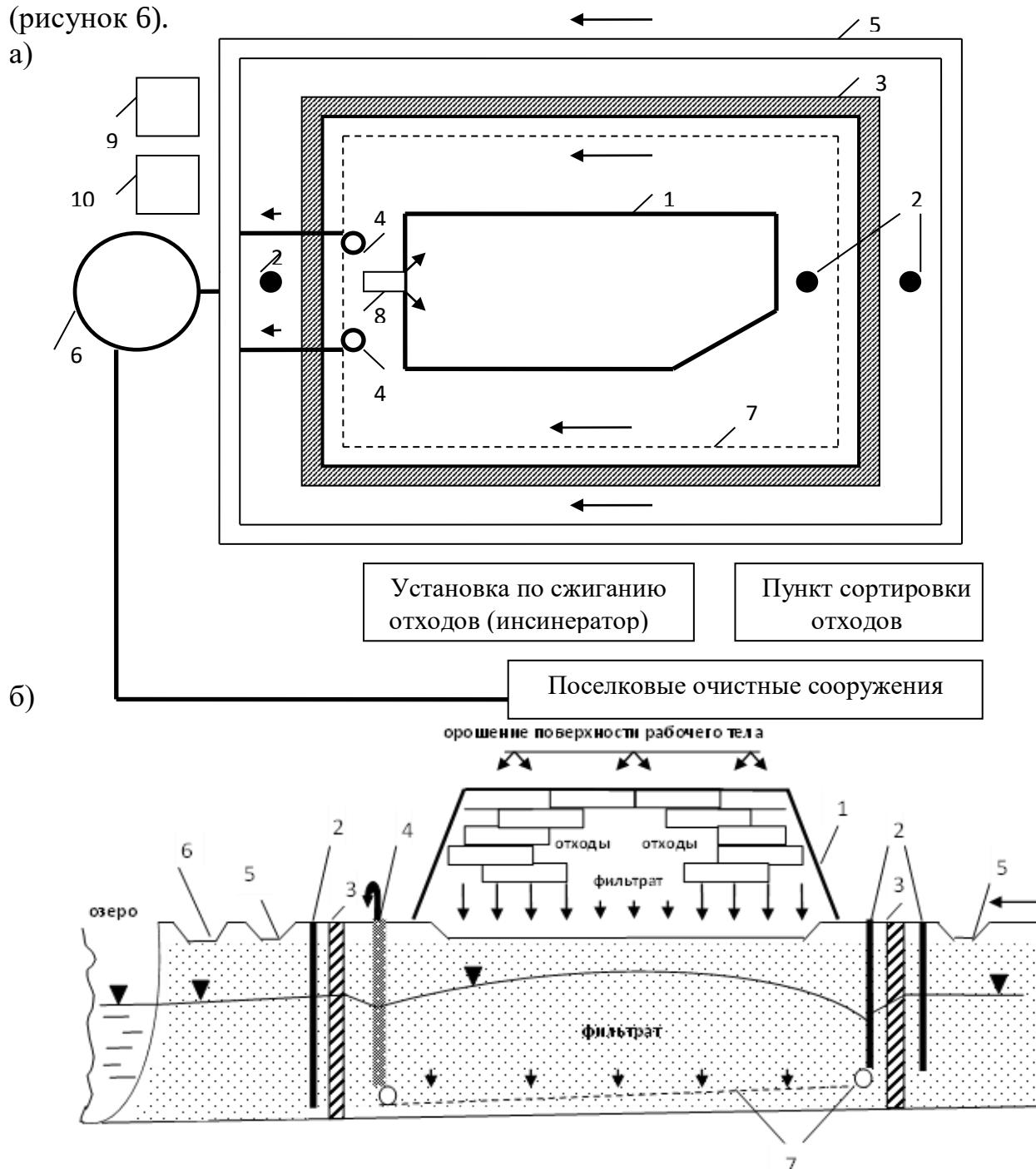


Рисунок 6 – Схема управления фильтрационным потоком полигона ТКО для защиты грунтовых вод от загрязнения: а) план; б) разрез

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

Для оценки эффективности такого решения выполнено прогнозирование распространения веществ в озере Селигер, в случае направления загрязненных грунтовых вод на очистные сооружения и сброса их после совместной очистки с поселковыми сточными водами. В результате получено, что концентрация аммонийного азота будет меньше нормативного значения (0,5 мг/л) на расстоянии 500 м от берега за счет разбавления озерной водой.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационного исследования.

В **приложениях** приведены акты о передаче и внедрении результатов исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus

1. **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. DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-2-369-385> (Соискатель – 90%).

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК

2. 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 (Соискатель – 40%).

3. 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 (Соискатель – 70%).

4. 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 (Соискатель – 70%).

5. 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 (Соискатель – 80%).

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

6. 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 (Соискатель – 70%).

7. **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.

8. **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.

9. **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.

10. **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.

11. **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.

12. **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.

13. **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.

