

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

Институт Наук о Земле

Медведева Анжела Яновна

Выпускная квалификационная работа

«Прогнозирование выбросов парниковых газов от системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Санкт-Петербургской агломерации»

Уровень: бакалавриат

Направление подготовки 05.03.04 «Гидрометеорология»

Научный руководитель:

Исполняющий обязанности заведующего
кафедрой климатологии и мониторинга окружающей среды,
доцент кафедры,
доктор географических наук

Павловский Артем Александрович

Рецензент: Михайлов Кирилл Владимирович

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Определения	3
Введение	5
Глава 1	7
1.1. Общие сведения о парниковых газах	7
1.2. Основные нормативные документы, регулирующие содержание парниковых газов в атмосфере	9
1.3. Национальная политика России, в рамках сокращения выбросов парниковых газов 10	
1.4. Реализация климатических проектов в сфере обращения с отходами	12
Глава 2	15
2.1 Общие сведения о твердых коммунальных отходах	15
2.2. Существующие проблемы в секторе твердых коммунальных отходов в г. Санкт-Петербург	17
2.3. Влияние климатических факторов на деятельность по обращению с ТКО	20
2.4. Морфологический состав ТБО в Санкт-Петербурге	22
2.5. Полигоны и комплексы по переработке ТКО в Санкт-Петербургской агломерации 26	
2.5.1. Санитарная классификация и санитарно-защитные зоны объектов по обращению с отходами	30
2.6. Характеристика климатического режима Санкт-Петербурга	31
Глава 3	36
4.1. Исходные данные	36
4.2. Используемые методики для расчетов	36
4.2.1. Расчет выбросов парниковых газов	36
4.2.2. Методы обработки метеорологических данных	39
4.2.3. Методы расчета вредных выбросов от объектов обращения с ТКО	41
4.2.4. Расчёт рассеивания вредных веществ от объектов обращения с ТКО	41
4.3. Результаты	43
4.3. Выводы	57
Список литературы	58
Приложения	61

Определения

Климатический проект – это комплекс мероприятий, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение поглощения парниковых газов.

Накопление отходов – складирование отходов на срок не более чем одиннадцать месяцев в целях их дальнейших обработки, утилизации, обезвреживания, размещения.

Обезвреживание отходов – уменьшение массы отходов, изменение их состава, физических и химических свойств (включая сжигание, за исключением сжигания, связанного с использованием ТКО в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов), и (или) обеззараживание на специализированных установках) в целях снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

Обработка отходов – предварительная подготовка отходов к дальнейшей утилизации, включая их сортировку, разборку, очистку.

Объекты захоронения отходов – предоставленные в пользование в установленном порядке участки недр, подземные сооружения для захоронения отходов I – V классов опасности в соответствии с законодательством Российской Федерации о недрах.

Объекты обезвреживания отходов – специально оборудованные сооружения, которые обустроены в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения и предназначены для обезвреживания отходов.

Объекты размещения отходов – специально оборудованные сооружения, предназначенные для размещения отходов (полигон, шламохранилище, в том числе шламовый амбар, хвостохранилище, отвал горных пород и другое) и включающие в себя объекты хранения отходов и объекты захоронения отходов.

Парниковый газ – это газообразная составляющая атмосферы как природного, так и антропогенного происхождения, которая поглощает и испускает инфракрасное излучение, исходящее от земной поверхности, атмосферного воздуха и облаков. [1]

Раздельное накопление – твердых коммунальных отходов предусматривает их разделение по компонентам с целью последующей утилизации.

Размещение отходов – хранение и захоронение отходов.

Региональный оператор по обращению с твердыми коммунальными отходами (далее также – региональный оператор) – оператор по обращению с твердыми

коммунальными отходами – юридическое лицо, которое обязано заключить договор на оказание услуг по обращению с твердыми коммунальными отходами с собственником твердых коммунальных отходов, которые образуются и места накопления которых находятся в зоне деятельности регионального оператора.

Санитарно-защитная зона – специальная территория с особым режимом использования, которая устанавливается вокруг объектов и производств, являющихся источниками вредного воздействия на среду обитания и здоровье человека.

Твердые коммунальные отходы (далее – ТКО) – 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 **ТКО** также относятся отходы, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами.

Утилизация отходов – использование отходов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг, включая повторное применение отходов, в том числе повторное применение отходов по прямому назначению (рециклинг), их возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки (регенерация), извлечение полезных компонентов для их повторного применения (рекуперация), а также использование твердых коммунальных отходов в качестве возобновляемого источника энергии (вторичных энергетических ресурсов) после извлечения из них полезных компонентов на объектах обработки, соответствующих требованиям, предусмотренным пунктом 3 статьи 10 настоящего Федерального закона (энергетическая утилизация).

Сокращения

МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата

ТКО – Твердые коммунальные отходы

КПО – Комплекс по переработке отходов

ПГ – Парниковые газы

СЗЗ – Санитарно-защитная зона

Терсхема – Территориальная схема обращения с отходами производства и потребления

ЗВ – Загрязняющие вещества

Введение

Изменение климата – одна из основных проблем современной цивилизации, привлекающая к себе внимание правительств практически всех стран мира, научных центров и отдельных специалистов, общественных организаций и широких слоев населения.

Согласно последнему отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в настоящее время наблюдаются изменения климата Земли в каждом регионе и во всей климатической системе. Многие из наблюдаемых изменений индикаторов глобального потепления являются беспрецедентными за тысячи и даже сотни тысяч лет [27].

Принятие незамедлительных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями является одной из глобальных целей устойчивого развития Организации объединенных наций [15].

В соответствии с наиболее обоснованной в настоящее время антропогенной теорией изменения климата, основным фактором, ответственным за развитие глобального потепления, является существенное увеличение концентрации термодинамически активных газов в атмосфере в результате человеческой деятельности, усиливающее естественный парниковый эффект [27].

В целях противодействия развитию глобального потепления, как на международном, так и на национальном уровне предусмотрен комплекс мер по сокращению выбросов парниковых газов в различных секторах экономики: энергетике, промышленности, сельском хозяйстве, землепользовании, лесном хозяйстве, отходах.

В Российской Федерации наиболее выраженные положительные тенденции выбросов парниковых наблюдаются в отрасли, связанной с обращением с отходами производства и потребления. Особенно остро данная проблема стоит в крупнейших агломерациях страны, мероприятия по решению которой заложены в Национальном проекте «Экология».

В настоящее время 80% образующихся коммунальных отходов захоранивают на полигонах без предварительной обработки. Размещение отходов в них идет годами, в накапливающейся массе происходят органические процессы разложения, которые приводят к образованию биогаза, его дальнейшему выбросу в атмосферу и, как следствие, увеличению общей концентрации термодинамически активных примесей в ней.

При этом происходящие изменения гидротермического режима в местах образования и размещения отходов могут оказывать влияние на интенсивность выбросов парниковых газов от них.

Агломерация Санкт-Петербург является крупнейшей урбанизированной территорией в Северо-Западном регионе России и Европы, возрастающее население которой производит все большее количество твердых коммунальных отходов, основная часть которых в настоящее время не обрабатывается и захоранивается на полигонах.

В целях решения данной проблемы в документах стратегического планирования Санкт-Петербурга и Территориальной схеме обращения с отходами производства и потребления предусмотрен комплекс мероприятий по принципиальному изменению сложившегося положения.

В период глобального потепления представляется целесообразным смоделировать различные сценарии развития отрасли обращения с твердыми коммунальными отходами в Санкт-Петербурге в части оценки выбросов парниковых газов от нее, а также рассмотреть возможности реализации климатических проектов, направленных на их сокращение.

В контексте актуальности данной проблемы **целью** работы является оценка выбросов парниковых газов от сектора обращения с твердыми коммунальными отходами при различных сценариях технологического развития и изменения климата на долгосрочный период.

Задачи дипломной работы:

1. Выполнить комплексный анализ существующего положения в отрасли обращения с твердыми коммунальными отходами в Санкт-Петербурге и выбросов парниковых газов от нее.
2. Оценить влияние климатических факторов на выбросы парниковых газов от мест размещения твердых коммунальных отходов.
3. Провести сравнительный анализ и оценку различных сценариев по развитию отрасли обращения с твердыми коммунальными отходами в Санкт-Петербурге с позиций минимизации выбросов парниковых газов и снижения негативного воздействия на окружающую среду от нее.
4. Оценить возможность реализации климатических проектов в отрасли обращения с твердыми коммунальными отходами в Санкт-Петербурге.

Объект исследования – выбросы парниковых газов.

Предмет исследования – эмиссии парниковых газов от сектора по обращению с твердыми коммунальными отходами в Санкт-Петербурге.

Глава 1

1.1. Общие сведения о парниковых газах

С начала промышленной революции, которое приходится на 1750–1770 гг., концентрация в атмосфере термодинамически активных газов, обуславливающих парниковый эффект, возрастает. В настоящее время существует обоснованный консенсус мирового климатического сообщества относительно того, что этот процесс приводит к увеличению количества тепла, поглощаемого приземной атмосферой и, как результат, к глобальному изменению климата.

Перечень парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет их выбросов и ведение кадастра, утвержден распоряжением Правительства РФ от 22.10.2021 №2979-р. К ним относятся диоксид углерода, метан, закись и трифторид азота, гексафторид серы, отдельные виды перфторуглеродов и гидрофторуглеродов [16].

Следует отметить, что такие важные парниковые газы, как водяной пар и озон имеют как антропогенные, так и природные источники образования, но учет их выбросов не ведется по причине трудностей, связанных с выделением антропогенной составляющей глобального потепления, обусловленной их присутствием в атмосфере [5].

Впервые систематические наблюдения за концентрациями парниковых газов в атмосфере начал выполнять Чарльз Киллинг. Он в 1958 г. в рамках работы в Институте океанографии имени Скрипса Калифорнийского университета начал производить регулярные измерения концентрации атмосферного углекислого газа на Южном полюсе и на Гавайях. Тем самым Киллинг привлек внимание общественности к проблеме антропогенного воздействия на увеличение концентрации углекислого газа [30]. В рамках его работы был создан График Киллинга, который описывает изменения концентрации углекислого газа с 1958 года. Впоследствии подобные графики были созданы для метана, закиси азота и гексафторида серы.

На рисунке 1 показан График Киллинга, который представляет собой среднегодовые значения углекислого газа за период с 1958-2021гг. Красные линии и символы представляют собой среднемесячные значения с центром в середине каждого месяца. Черные линии и символы представляют то же самое после поправки на средний сезонный цикл. Последний определяется как скользящее среднее семи смежных сезонных циклов с центром в корректируемом месяце, за исключением первых и последних трех с половиной лет записи, где сезонный цикл был усреднен за первые и последние семь сезонных циклов. Данные представлены в виде мольной доли сухого воздуха, определяемой как количество молекул двуокиси углерода, деленное на количество всех молекул в воздухе, включая сам

CO₂, после удаления паров воды. Молярная доля выражается в частях на миллион (ppm) [31]. График показывает устойчивый рост средней концентрации атмосферного CO₂ с 315 ppm в 1958 году до 412,5 ppm в 2021 году.

Глобальная концентрация CH₄ в атмосфере выросла с доиндустриального значения, которое составляло около 715 ppb, до 1732 ppb в начале 1990-х годов, а в 2021 году составило 1910.8 ppb [31]. Темпы роста с начала 1990-х годов снизились, так как общий объем выбросов (сумма антропогенных и естественных источников) за этот период был практически постоянным.

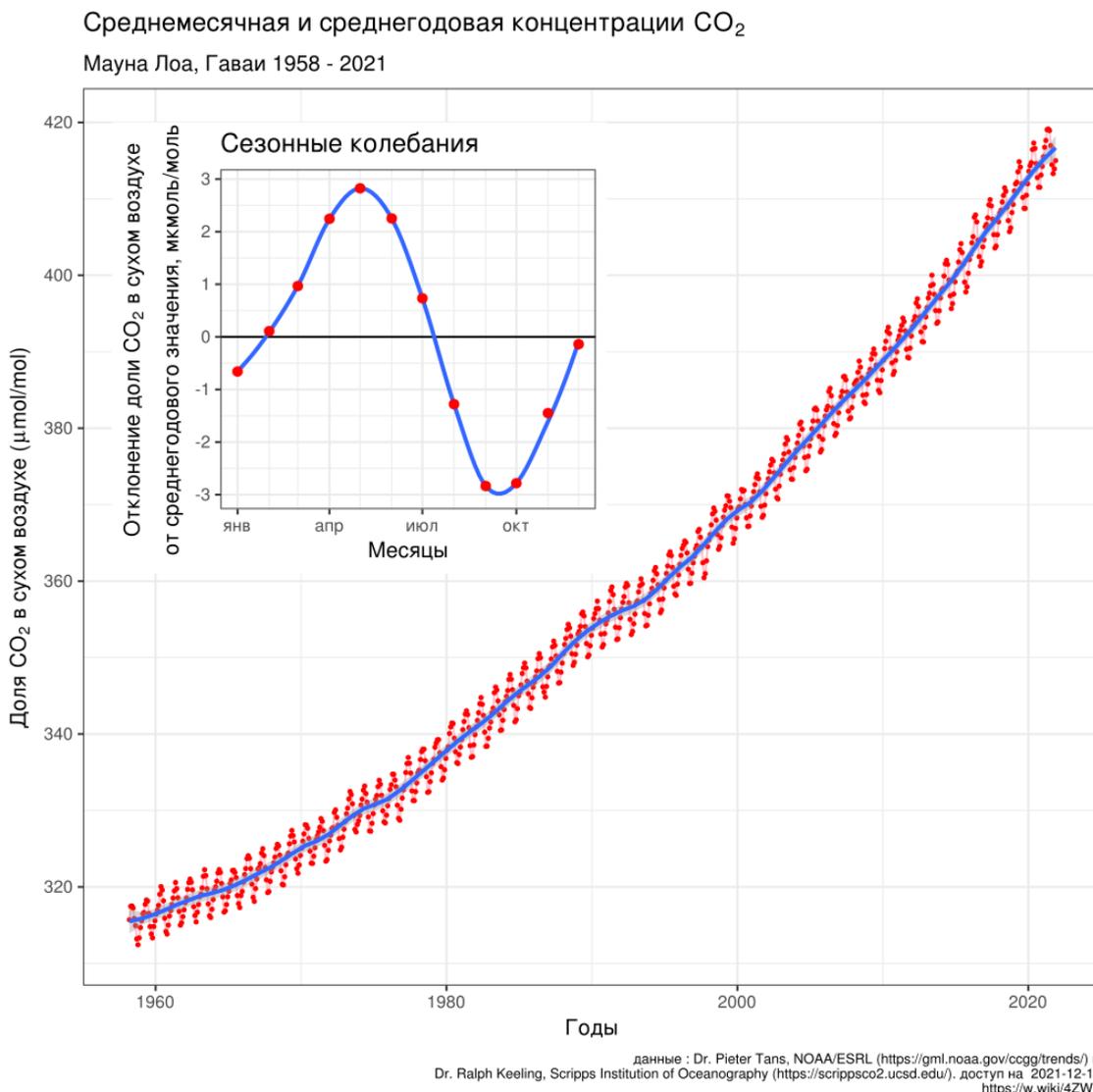


Рисунок 1. Среднегодовые значения углекислого газа, измеренные в Обсерватории Мауна-Лоа в период 1958-2021 гг.

Идея парникового эффекта была выдвинута впервые в 1827 году Жозефом Фурье в статье «Записка о температурах земного шара и других планет» [29]. Фурье считал, что оптические свойства атмосферы Земли аналогичны оптическим свойствам стекла, то есть её прозрачность в инфракрасном диапазоне ниже, чем в оптическом. Однако

количественные данные по поглощению атмосферы в инфракрасном диапазоне долгое время являлись предметом дискуссий. Решающий вклад в решение этого вопроса внес Сванте Аррениус в 1896 году [26], рассчитав коэффициенты поглощения инфракрасного излучения водяным паром и углекислым газом в атмосфере, также и изменения температуры Земли при вариациях концентрации углекислого газа.

Механизм парникового эффекта заключается в следующем. Солнечные лучи достигают поверхности Земли в виде коротковолнового спектра, поглощаясь при этом почвой, растительностью, водной поверхностью и др. Затем нагретые поверхности частично отдают тепловую энергию обратно в атмосферу, но уже в виде длинноволнового излучения. При этом в атмосфере содержатся газы (кислород, аргон, азот), как не поглощающие тепловое излучение с земной поверхности, так и газы (углекислый газ, угарный газ, группа углеводородов), поглощающие тепловое излучение, идущее от поверхности Земли. Поскольку скорость накопления в атмосфере последних неуклонно растет, это приводит к возникновению экрана, мешающего отдаче тепла, что вызывает парниковый эффект. Он же, в свою очередь, может являться причиной глобального потепления. Данные газы возникают и накапливаются в силу естественных источников выброса (вулканы, таяние вечной мерзлоты, космические частицы и др.), а также от антропогенных источников, например, при сжигании горючих ископаемых и других производственных процессов.

В настоящей работе основное внимание уделено оценке антропогенных выбросов парниковых газов от отрасли, связанной с обращением с твердыми коммунальными отходами.

1.2. Основные нормативные документы, регулирующие содержание парниковых газов в атмосфере

В настоящее время основным международным документом, регулирующим глобальное антропогенное воздействие на климат, является Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) [15], принятая 9 мая 1992 года и вступившая в силу 21 марта 1994 года. Это соглашение об общих принципах совместных межгосударственных действий для сдерживания процессов изменения климата на планете. Россия является участником РКИК ООН с 28 марта 1995 года [8]. В настоящее время она ратифицирована 197 государствами. Высшим органом РКИК ООН, определяющим механизмы ее действия и отслеживающим ход выполнения поставленных задач, является ежегодная Конференция сторон.

В декабре 1997 года на 3 Конференции сторон в Киото был принят Киотский протокол к РКИК ООН, обязывающий развитые страны и страны с переходной экономикой – стороны Протокола (в том числе Россию) – ограничивать выбросы парниковых газов и предусматривающий различные финансовые механизмы для этого [3]. В числе поставленных в нем целей – сокращение суммарного выброса парниковых газов от уровней 1990 года. Документ вступил в силу 16 февраля 2005 года.

Решением 21 Конференции сторон РКИК ООН от 12 декабря 2015 года был принят новый климатический договор – Парижское соглашение. Его главная цель заключается в укреплении глобальных мер по борьбе с изменением климата, чтобы удержать повышение глобальной температуры в этом веке в пределах +2 °С по отношению к доиндустриальному уровню и попытаться снизить этот показатель до +1,5 °С. Парижское соглашение имеет важное отличие от Киотского протокола, заключающееся в том, что страны-сторонники на добровольной основе разрабатывают национальные стратегии по сокращению выбросов парниковых газов. Но при этом в рамках «зеленой» политики встал вопрос о введении углеродного сбора на импорт товаров. Данный вопрос стоит очень остро для нашей страны, так как мы являемся основными экспортерами CO₂, наряду с США и Китаем, а также остаемся одними из главных партнеров Европейского союза по торговле энергоресурсами. Введение углеродного сбора может сильно сказаться на экономической политике РФ. По оценкам BCG (Boston Consulting Group) данный налог может обойтись российскому нефтегазовому сектору в 1,4–2,5 млрд долл. США ежегодно, сектору черных металлов и угля – в 0,6–0,8 млрд долл. США, цветных металлов – в 0,3–0,4 млрд долл. США, прочим секторам экономики – в 0,8–1,1 млрд долл. США. Кроме того, в силу большей углеродоемкости Россия может уступить часть нефтяного рынка ЕС Саудовской Аравии ввиду снижения рентабельности, а для производителей азотных удобрений углеродный сбор может стать предельно высоким, достигая 40–65% текущей экспортной стоимости удобрений [3].

1.3. Национальная политика России, в рамках сокращения выбросов парниковых газов

В силу меняющейся ситуации 21 сентября 2019 года Россией было утверждено Парижское соглашение, в соответствии с чем был составлен план по сокращению выброса парниковых газов до уровня не более 70-75% от объема в 1990 году [32], в том числе с учетом поглощающей способности лесов. Суммарный выброс парниковых газов в нашей стране в 1990 году составлял более 3 млрд тонн CO₂-экв. в год. При этом в России наблюдается негативная динамика: с 2010 года количество, поглощаемых парниковых газов

лесами на территории страны, сокращается, а объемы отходов растут, также как и объемы вырубок лесов и пожаров в них. Это затрудняет процесс становления России углеродно-нейтральной страной. В силу этого правительством РФ был выпущен ряд законов, направленных на решение поставленной задачи. Основная цель – это создание условий для устойчивого и сбалансированного развития экономики Российской Федерации при снижении уровня выбросов парниковых газов. По состоянию на 2020 год Российская Федерация выполнила задачу по сокращению выбросов ПГ от нормы 1990 года (Решетников, 2020), но во многом это результат сокращения производственных мощностей страны. Урегулирование выброса ПГ от различных секторов экономики – крайне непростая задача, требующая комплексного вмешательства государства, бизнеса, а также иностранных инвестиций для технологического обслуживания. Сектор экономики, в котором реально реализовать «зеленую политику» – это сектор «отходы».

В настоящее время реализуется национальный проект «Экология» [11], направленный на охрану окружающей среды. Одно из направлений данного нацпроекта – это создание комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами. Важнейшими задачами данного проекта является обеспечение 100% сортировки отходов до 2030 года, сокращение объемов отходов, направляемых на полигоны, в два раза, а также рекультивация свалок.

Помимо этого, в июне 2021 года вступил в силу Федеральный закон № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», определяющий основы правового регулирования отношений в сфере хозяйственной и иной деятельности, которая сопровождается выбросами парниковых газов и осуществляется на территории Российской Федерации. В рамках данного закона предусматривается создание климатического проекта. Климатический проект – комплекс мероприятий, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов или увеличение поглощения парниковых газов. По сути, климатический проект – это часть запускаемого в России рынка углеродных единиц. Он должен функционировать по следующей схеме. Углеродные единицы должны выпускаться при сокращении компаниями выбросов в РФ ниже выделенных им квот и могут быть проданы или переданы компаниям, выбросы которых превышают квоты, и зачтены последним при оценке их негативного воздействия на окружающую среду. Наиболее важным моментом в осуществлении таких проектов является единство методик и точность подсчетов парниковых выбросов [10]. Также должен быть исключен двойной учет результатов климатических проектов. Двойной учет – это одна из главных претензий к углеродным рынкам, а его исключение – одно из ключевых требований к климатическим проектам. Предложить и зарегистрировать климатический проект может юридическое или

физическое лицо, индивидуальные предприниматели, главное, чтобы он соответствовал определенным критериям, таким как:

- Не противоречить федеральному и законодательству региона, на территории которого реализуется проект, и осуществляться в соответствии с документами национальной системы стандартизации в области ограничения выбросов парниковых газов;
- Не приводить к увеличению выбросов парниковых газов или снижению уровня их поглощения за пределами проекта;
- Быть дополнительным по отношению к мероприятиям, направленным на выполнение предусмотренных законодательством Российской Федерации обязательных требований, действующих по состоянию на начало реализации проекта;
- Не быть следствием сокращения производства;
- Сокращение (предотвращение) выбросов парниковых газов и (или) увеличение их поглощения в течение срока реализации проекта не является результатом влияния факторов, не связанных с мероприятиями проекта.

В настоящее время создан реестр углеродных единицы – информационная система, в которой регистрируются климатические проекты и ведется учет углеродных единиц и операций с ними (<https://carbonreg.ru/>).

1.4. Реализация климатических проектов в сфере обращения с отходами

Классическими климатическими проектами в этой сфере являются проекты дегазации полигонов (полезная утилизация свалочного газа), которые дополнительно решают проблему накопленного экологического вреда полигонов ТКО и сокращения эмиссии парниковых газов. Улавливание свалочного газа с последующей утилизацией метана – высокоэффективный способ снижения выбросов парниковых газов для сектора обращения с коммунальными отходами. Более того, при создании благоприятных условий и соблюдении критериев к климатическим проектам можно отнести проекты по сбору, сортировке, переработке, созданию вторичных материальных ресурсов. На данный момент в России в сфере обращения с отходами преобладает линейная экономика [9]: мы используем природные ресурсы для добычи, производим различные материалы, потребляем их и выбрасываем, а затем это отправляется на свалку, не принося более никакой пользы и негативно воздействуя на окружающую среду. Классическая схема линейной экономики представлена на рисунке 2. Если мы учтем, что переработке подлежит до 90% объема образующихся в России твердых ТКО, то мы сможем предотвратить их

захоронение и последующий выброс свалочного газа от них. Для этого необходимо активно внедрять экономику замкнутого цикла. Выгодность такого подхода состоит в том, что для производства продукции из вторичного сырья требуется от 5 до 20% того объема затрат ресурсов и энергии, который уходит на первичное производство, что бесспорно снижает углеродный след промышленных предприятий.

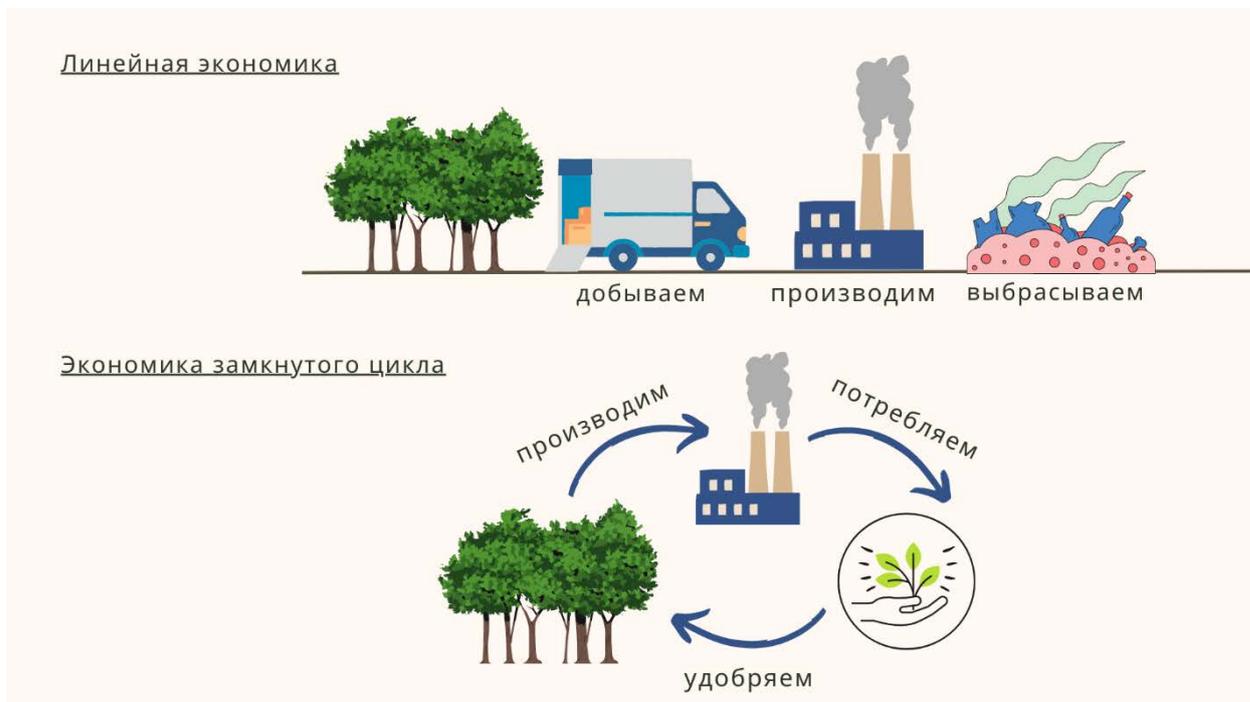


Рисунок 2. Схема линейной экономики и экономики замкнутого цикла в сфере обращения с отходами

Рассмотрим более подробно практические аспекты реализации климатических проектов по дегазации полигонов ТКО. В таком случае наилучшим вариантом будет являться дегазация полигона с полезной выработкой электроэнергии (э/э) и тепла. Потребитель образующихся э/э и тепла, как правило, либо производственные объекты в границах полигона, либо жилые поселки, либо парники для выращивания растений. Существует международная методика CDM AMS-III.G Landfill methane recovery (Утилизация метана на полигонах), и предлагаемый климатический проект должен удовлетворять её стандартам. Особенности данной методики представлены в таблице 2.

Таблица 2. Особенности методики CDM

	AMS-III.G Landfill methane recovery (Утилизация метана на полигонах)	ACM0001 Flaring or use of landfill gas (Сжигание или использование свалочного газа)
Область применения	Проекты с годовым снижением выбросов парниковых газов < 60 тыс. тCO _{2e}	Крупномасштабные проекты
		Любые смешанные отходы

Характеристика полигона	Твердые ТКО, содержащие биоразлагаемые органические вещества	
Параметры для мониторинга	<ul style="list-style-type: none"> • Количество извлеченного и используемого метана на основании показаний счетчиков непрерывного потока • Доля метана в свалочном газе • Эффективность при факельном сжигании • Выработка энергии (если применимо) 	<ul style="list-style-type: none"> • Объем улавливаемого свалочного газа • Доля метана в свалочном газе • Выработка энергии (если применимо)
Использование (утилизация) свалочного газа	Выработка тепла и(или) электричества посредством сжигания метана	<ul style="list-style-type: none"> • Выработка тепла и(или) электричества посредством сжигания метана • Использование метана в газораспределительных системах или на транспорте

Таким образом, мы видим, что сфера обращения с ТКО является одной из тех, где реализация климатических проектов приводит к весьма позитивным результатам.

Глава 2

2.1 Общие сведения о твердых коммунальных отходах

В рамках национального проекта «Экология» встал вопрос о сокращении выбросов парниковых газов от экономического сектора «Твердые коммунальные отходы». По состоянию на 2021 год данная индустрия генерирует 1,6 Гт CO_{2-экв.} прямых антропогенных эмиссий парниковых газов в год, что составляет около 4% всех выбросов парниковых газов. Этот показатель ниже, чем в секторе энергетики или транспорта, но за счет внедрения новых технологий можно значительно снизить этот показатель. В России выбросы от удаления твердых отходов увеличились с 33 млн тонн в 1990 году более чем на 100% до 69 млн тонн CO_{2-экв.} в 2017 году. Что касается выбросов метана, российский сектор утилизации твердых бытовых отходов является вторым по величине источником выбросов в стране и на его долю приходится 18,1% от общего объема выбрасываемого метана, в основном в виде свалочного газа, в то время как на энергетический сектор приходится 61,2% выбросов метана.

Территориальная схема обращения с отходами (далее – Терсхема) – это основной документ, по которому осуществляется регулирование отходов в регионах [22].

Согласно распоряжению Комитета по тарифам Санкт-Петербурга от 14.04.2017 №30-р, нормативы накопления ТКО на территории Санкт-Петербурга составляют:

- Для многоквартирных домов – 382 кг на проживающего в год.
- Для индивидуальных жилых домов – 697 кг на одно домовладение в год.

По данным на 2021 год доля обработанных, утилизированных, обезвреженных твердых коммунальных отходов в общем объеме образовавшихся ТКО составляет лишь **38,4%**. При этом если обратим внимание на долю отправленных на утилизацию отходов от общего объема ТКО в 2021 году, то она составит лишь 8,8%, доля обработанных отходов – 25,7%, а на захоронение отправляется 91,2% от общей доли ТКО. Таким образом, большая часть ТКО захоранивается.

Одной из целей Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 года по направлению «Повышение качества городской среды» является «Обеспечение экологического благополучия и благоустройства территории Санкт-Петербурга», одной из задач которого – **«Создание эффективной системы размещения, утилизации, обработки, обезвреживания отходов производства и потребления».**

Как было сказано ранее, в рамках национального проекта «Экология» активно реализуются проекты в секторе отходов. Санкт-Петербург не стал исключением, и утвердил свой план. **Цель проекта:** эффективное обращение с отходами производства и потребления в Санкт-Петербурге. К 2024 году запланировано достижение показателя «доля обезвреженных, утилизированных, обработанных ТКО в общем объеме образовавшихся отходов» на уровне 48,7 % [17].

Таблица 3. Целевые показатели национального проекта «Экология» в части формирования комплексной системы обращения с ТКО

Наименование показателя	2021	2022	2023	2024
Доля обезвреженных, утилизированных, обработанных ТКО в общем объеме образовавшихся отходов, в том числе:	38,4	38,4	48,7	48,7
– доля ТКО, направленная на обезвреживание (утилизацию)	29,64	29,64	37,60	37,60
– доля ТКО, направленная на обработку	8,76	8,76	11,10	11,10
Доля обеспеченности жителей пунктами (оборудованием) приема (сбора) опасных отходов	8,2	8,5	8,8	9,1

Целевые показатели п. 4.3.8 **Прогноза социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 года** в части доли обработанных, утилизированных, обезвреженных ТКО:

- на 2030 год в целевом варианте – 100%, в варианте базовый плюс – 84,6%;
- на 2035 год – 100%.

Данный показатель отражает долю отходов, которая не попала на полигон. Таким образом, буквально за два года планируется сократить количество захораниваемых отходов в 2 раза и через 8 лет минимизировать эти цифры до максимума.

В соответствии данным петростата о прогнозе количества населения с помощью норматива градостроительного проектирования (НГП) был рассчитан прогноз образовавшихся ТКО. По НГП нормативом накопления считается 362 тонны на 1000 человек в год.

Таблица 4. Прогноз образования ТКО до 2040 года, тонн

Год	Население, тыс. чел.			Образование ТКО, тонн в год		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
кол-о	5447	5469	5487	1971814	1979778	1986294



Рисунок 3. Прогностическое образование ТКО и численности населения

Решение поставленной задачи требует комплексного подхода, требующего особого внимания к вопросу регулирования отходов, их учета и способа обращения с ними. На данный момент предпринимаются меры по рекультивации и декарбонизации существующих полигонов в Санкт-Петербургской агломерации. Также к 2024 году планируется внедрение 6 мусороперерабатывающих заводов, мощностью в 600 тыс. тонн в год каждый. И все же, не смотря на большое внимание к данному вопросу, в этой сфере все ещё существует ряд нерешаемых проблем.

2.2. Существующие проблемы в секторе твердых коммунальных отходов в г. Санкт-Петербург

Структура обращения с ТКО в России устроена так, что захоронение отходов на полигонах обходится в разы дешевле, нежели их утилизация. Однако отсутствие необходимой инфраструктуры – не единственная проблема. Большая часть коммунальных отходов собирается в смешанном виде. Основной недостаток данного способа – существенное снижение количества извлекаемых вторичных ресурсов, потенциально пригодных к переработке (текстиль, бумага, пластик и др.), при этом некоторые виды отходов нуждаются в дополнительной очистке.

Помимо этого, продлеваются сроки действия старых полигонов, а при их закрытии создаются новые объекты размещения отходов (далее ОРО). Таким явным примером может послужить полигон Новоселки, вопрос о рекультивации которого встал ещё в 2013 году, но официальное закрытие состоялось лишь в 2022 году. Полигон ежегодно принимал около 600 тыс. тонн, сейчас такие объемы вывозятся на полигон «Северная Самарка». Современные ОРО, несмотря на высокие экологические требования, предъявляемые к проектной документации, также оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Они подвергаются постоянным атмосферным явлениям и претерпевают на себе климатические изменения, что непосредственно влияет на выброс, исходящий от них.

Финансовый вопрос не менее важный. Создание объектов инфраструктуры, которые позволяют достигнуть показателей нацпроекта «экология», требует сотни миллиардов рублей, при этом большая часть, выделяемая из госбюджета, уже была израсходована. А на региональном уровне главный источник финансирования – платежи граждан. Их величина определяется нормативами накопления ТКО и устанавливаемой тарификацией.

Существует также проблема в трудности учета образующихся ТКО, а также в плохо организованной структуре этой отрасли. Связано это во многом с тем, что сведения для формирования терсхем обязаны подавать только государственные предприятия. Частные предприятия боялись заявлять о себе, так как их могли замучить проверками. В Санкт-Петербурге до 2022 года данные о накопленных значениях ТКО должны были предоставлять местные операторы по отходам, занимающиеся забором, утилизацией и захоронением ТКО. В силу непрозрачности деятельности этих предприятий фактические данные не совпадают с реальными, некоторые показатели, такие как объемы полигонов, просто не фигурируют ни в одних официальных источниках. Это также приводило к образованию несанкционированных свалок вокруг города. Для решения данной проблемы с 1 января 2022 года в Санкт-Петербурге вступила в силу мусорная реформа. Ключевой момент мусорной реформы заключается в действии единого регионального оператора (ч. 1 ст. 24.6 Федерального закона от 24.06.1998 № 89 ФЗ «Об отходах производства и потребления»). На территории Санкт-Петербурга региональным оператором признано АО «Невский экологический оператор». Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга заключили договор с Невским экологическим оператором на ближайшие 10 лет. В область ответственности регионального оператора входит выполнение основных целей и задач, описываемых в мусорной реформе. Они включают в себя:

- урегулирование потоков отходов и недопущение их попадания на несанкционированные свалки;
- улучшение экологической ситуации в Санкт-Петербурге;
- обеспечение прозрачности обращения с ТКО на всех этапах. За весь этот процесс теперь отвечает одна организация – региональный оператор;
- создание единых стандартов по оказанию услуги по обращению ТКО;
- повышение качества услуги по обращению ТКО;
- увеличение доли отходов, направляемых на переработку, и возвращенных в экономику замкнутого цикла;
- содействие к использованию вторичных материальных ресурсов, извлекаемых при обработке ТКО.

Немаловажно отметить и тот факт, что Невский экологический оператор планирует создание производственных комплексов по обработке отходов. Они предусматривают переработку ТКО, крупногабаритных и строительных отходов, объемом 600 тыс. тонн в год каждый. Переработка заключается главным образом в сортировке (для извлечения вторсырья).

Абсолютно точно можно утверждать, что для эффективной работы КПО необходимо обеспечить раздельное накопление ТКО в местах их образования. При организации раздельного накопления твердых коммунальных отходов приоритетным является накопление, при котором органические (биоразлагаемые) компоненты накапливаются и удаляются обособленно от других ТКО. Мусор, для последующей его утилизации, должен сортироваться ещё на месте его образования – то есть непосредственно в жилых домах. Это обнажает социальную проблему наших граждан, у которых культура раздельного сбора мусора не привита в привычку. Те люди, что имеют контейнеры раздельного сбора мусора на площадках сбора, все равно пренебрегают сортировкой. Отдельная часть населения, наоборот, готова соблюдать данные меры, но в силу отсутствия контейнерных площадок в пешей доступности от местожительства, не делает этого. Нужно стремиться к повышению уровня осознанного потребления, а также формированию привычки сортировки ТКО гражданами на уровне домовладений. Необходимо внедрять экопросвещение в образовательные учреждения, предусматриваемое волонтерскую работу, субботники и тд. Также на законодательном уровне следует предусмотреть санкции за неправильную сортировку мусора, как сделано в Великобритании, Австрии, Австралии и ряда других стран.

2.3. Влияние климатических факторов на деятельность по обращению с ТКО

Стоит сказать, что несортированные ТКО весьма неблагоприятны в санитарно-эпидемиологическом отношении и создают опасность для здоровья населения, угрозу нарушения санитарно-бытового комфорта, загрязнения почвы, источников водоснабжения и воздушной среды.

Химическую жизнь мусора можно разделить на 4 главных стадии. Первая фаза характеризуется деятельностью аэробных бактерий (те, что способны жить и развиваться в присутствии кислорода). Эти бактерии расщепляют длинные молекулярные цепочки, из которых состоит органический мусор, в основном пищевые отходы. Данная фаза длится до тех пор, пока в мусорной массе есть кислород. Когда же он полностью израсходован, начинается вторая фаза. Тогда активизируется деятельность анаэробных бактерий, которые создают кислую среду. По мере того, как кислоты смешиваются с влагой, это высвобождает питательные вещества, делая азот и фосфор доступными для бактерий, которые в свою очередь интенсивно вырабатывают углекислый газ и водород. Если же на этом этапе в свалку попадет кислород, то все возвращается к первой фазе.

На третьей фазе анаэробные бактерии перерабатывают органические кислоты и формируют ацетаты. Благодаря этому среда становится более нейтральной, что способствует образованию метана. Эта стадия длится в течение 8-40 лет, причем первые 3 года процесс образования метана неустойчив. Самая длинная фаза – четвертая – начинается, когда состав и уровень производства газов становится относительно стабильным. На этом этапе свалочный газ содержит от 45 до 60 % метана, от 40 до 60 % углекислого газа, и от 2 до 9 процентов других газов, в том числе соединений серы. Эта фаза длится около 20 лет, но даже спустя десятки лет после прекращения поступления мусора на свалку, будет выделяться газ.

Одним из факторов, влияющих на морфологический состав ТКО, поступающих к местам размещения и переработки, является также различная степень предварительного извлечения вторичного сырья из состава ТКО, производимого, в частности, предприятиями перевозчиками ТКО на мусороперегрузочных станциях, где установлены конвейеры для частичной ручной сортировки ТКО. В настоящее время большая часть ТКО не проходит процесс обезвреживания, а следовательно, вся влажная и органическая часть захоранивается на полигонах вместе с твердыми фракциями. При этом состав выделяемого газа может быть очень разнообразным и зависеть от различных факторов, в том числе климатических: от времени года, климатической зоны, температуры и влажности.

Процессы анаэробного сбраживания во многом зависят от температуры окружающей среды. Доказано, что с увеличением температуры скорость выделения газа возрастает, причем также увеличивается кислотность смеси и меняется концентрация летучих органических кислот [7]. При возрастании температуры понижается концентрация метана. К перепадам температуры микроорганизмы крайне чувствительны, поэтому реагируют на них снижением своей активности.

Влажность – один из самых важных критериев, влияющих на скорость разложения. Недостаточная влажность (менее 20%) способствует остановке обмена веществ между микробами и окружающей средой. Вода выполняет транспортную функцию, разнося питательные вещества, распределяя микрофлору и разбавляя ингибиторы. В условиях высокой влажности при кислотности равной 4,5-6 и температуре воздуха выше 25°C фиксируется рост грибов, которые разрушают древесину, разлагают целлюлозу и др. Также наблюдается влияние влажности на скорость выделения биогаза: чем она больше, тем активнее происходит биологическое разложение отходов в анаэробных условиях. Оптимальная влажность для метаногенеза 55-80%. На городских свалках 30-40% влагосодержание считается высоким, 15-25% – низким и нормальным 25%. Если на полигоне отсутствует система рециркуляции, то влага на полигон поступает только с атмосферными осадками [4].

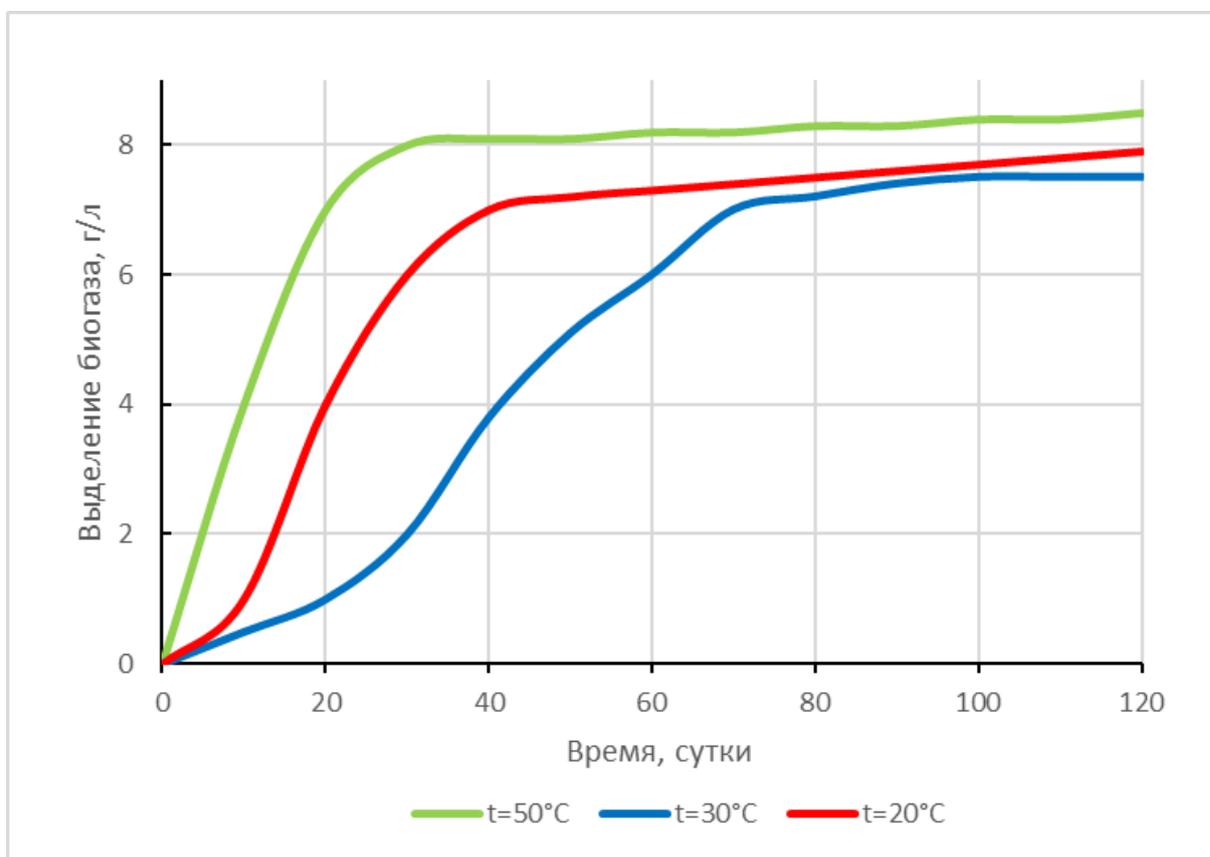


Рисунок 4. Выделение общего газа и метана в зависимости от времени при различных температурах (по данным из статьи Воронкова, 2013)

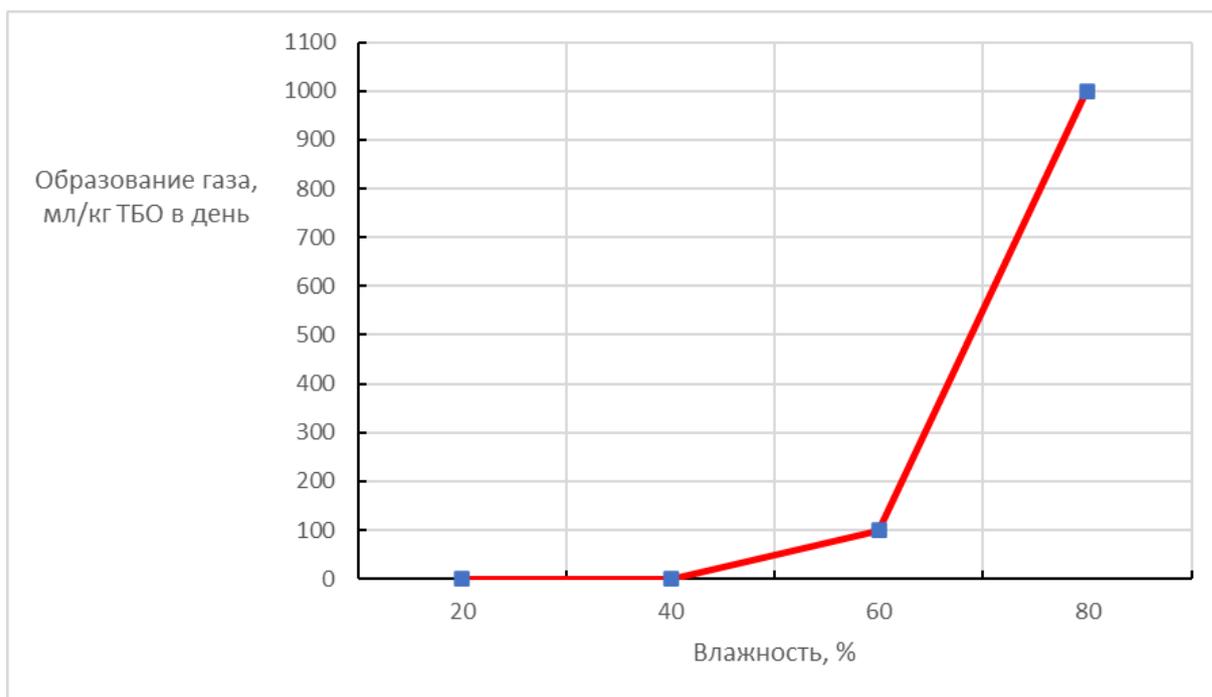


Рисунок 5. Зависимость образования биогаза от влажности (по данным из статьи Воронкова, 2013)

2.4. Морфологический состав ТКО в Санкт-Петербурге

ТКО являются многокомпонентным материалом, ряд фракций которого в результате утилизации может быть возвращен в народное хозяйство. Как было показано ранее влияние морфологического состава оказывает немаловажную роль на выбросы парниковых газов, поэтому ему стоит уделить особое внимание. Важно понимать то, что данные по морф составу ТКО усредненные и недостаточно достоверные, потому что доля сортируемых отходов мала, а следовательно, крайне сложно выявить тот или иной материал в смешанных ТКО.

В соответствии с терсхемой в ТКО Санкт-Петербурга преобладают следующие типы отходов (%): пищевые отходы – 27,4, бумага и картон – 21,5, пластмассы – 11,9, стекло – 8,9. Полезные компоненты (потенциальное вторичное сырье) и смешанные ТКО разделены примерно поровну. Для прогнозируемого количества ТКО в 2040 году это составит 1250 тыс. тонн для вторичных ресурсов и 1250 тыс. тонн для смешанных отходов. Средняя влажность отходов составляет 47%.

Существует несколько источников данных о морфологическом составе ТКО, целевые показатели которых существенно отличаются друг от друга. В работе

проанализированы основные источники, предоставляющие морфологический состав ТБО, и по каждому из них проведен расчет выбросов парниковых газов.

В таблицах 6, 7, 8 представлены данные о морфологическом составе ТКО из территориальной схемы по обращению с твёрдыми коммунальными отходами в Санкт-Петербурге, из Единой концепции обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области [6], а также из Концепции обращения с твердыми бытовыми отходами в Российской Федерации. МДС 13-8.2000 соответственно.

Таблица 5. Морфологический состав ТКО в Санкт-Петербурге из терсхемы

Тип ТКО	Относительная доля в общем составе, %
Органические отходы	27,4
Бумага и картон	21,5
Цветные металлы	3,8
Черные металлы	0,8
Стекло	8,9
ПЭТ (Полиэтилентерефталат – термопластик)	3,4
Пластик высокого давления	1,0
Полиэтиленовые пленки	7,4
Другие пластики	2,5
Текстиль, кожа, резина	4,3
Дерево	2,5
ПВХ (Поливинилхлорид)	0,1
Инертные материалы	12,8
Прочие материалы	2,8
Итого	100

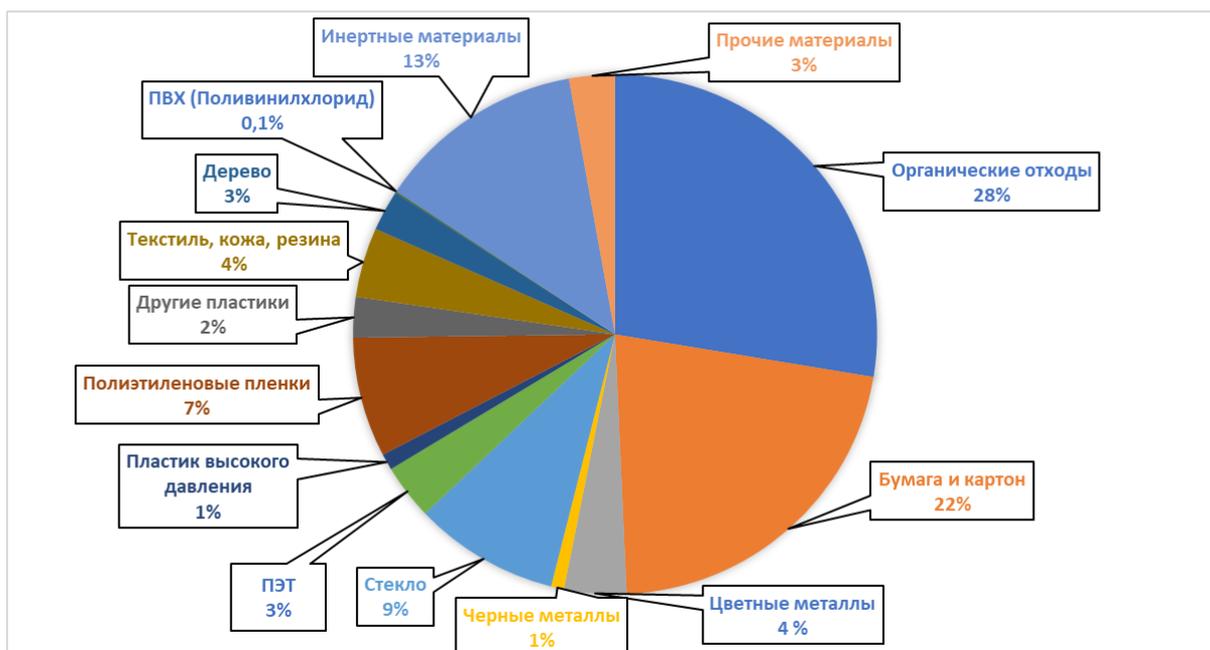


Рисунок 6. Морфологический состав ТКО в Санкт-Петербурге из Терсхемы

Таблица 6. Морфологический состав ТКО в Санкт-Петербурге из единой концепции

Компонент	Содержание, масс. %	
Бумага	13,5	
Картон	4,5	
Полимеры	18,0	
ПЭТ		5,0
Полиэтиленовая пленка		7,0
Прочая пленка		2,0
ПНД		2,0
ПВХ		0,1
Прочие пластики		1,9
Тетра-пак	1,5	
Металл черный	3,0	
Металл цветной	0,6	
Стекло	10,0	
Биоразлагаемая органика	22,0	
Пищевые отходы		20,0
Садово-парковые и прочие отходы		2,0
Текстиль, кожа и резина	3,4	
Дерево	2,0	
Прочее	5,5	
Крупногабаритный более 450 мм	3,0	
Отсев 0-20 мм	13,0	
Итого	100	

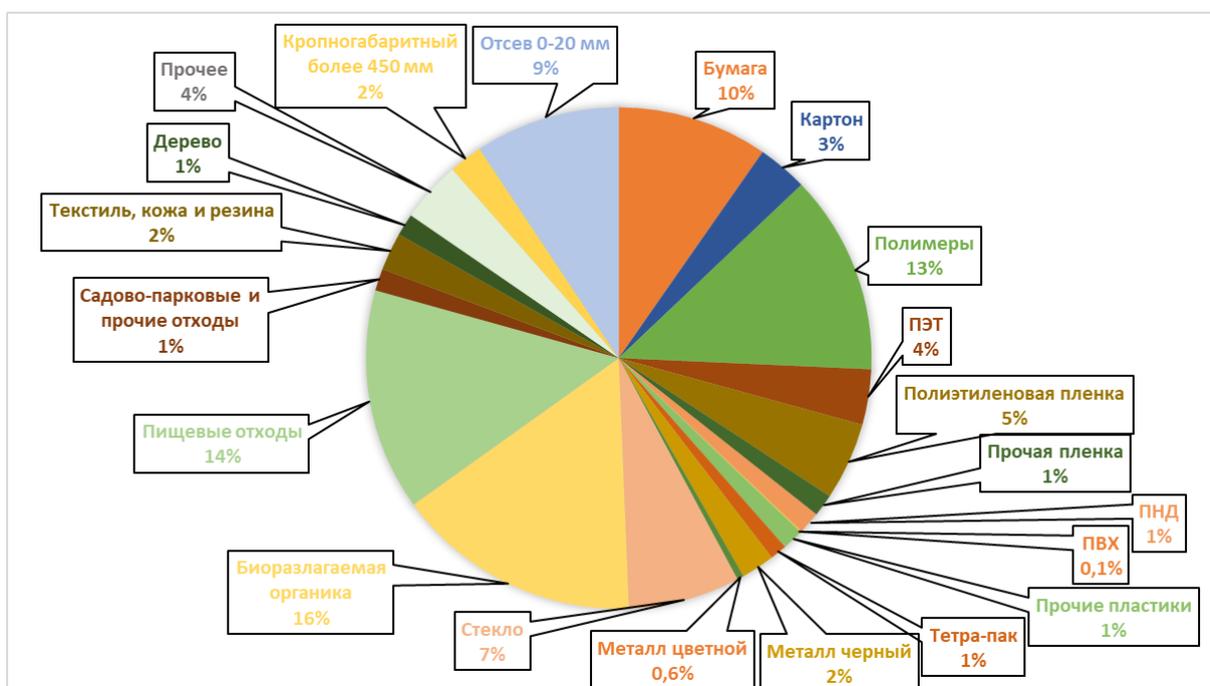


Рисунок 7. Морфологический состав ТКО в Санкт-Петербурге из единой концепции

Таблица 7. Морфологический состав ТБО для разных климатических зон, % по массе

Компонент	Климатическая зона		
	средняя	южная	северная
Пищевые отходы	35...45	40...49	32...39
Бумага, картон	32...35	22...30	26...35
Дерево	1...2	1...2	2...5
Черный металлолом	3...4	2...3	3...4
Цветной металлолом	0,5...1,5	0,5...1,5	0,5...1,5
Текстиль	3...5	3...5	4...6
Кости	1...2	1...2	1...2
Стекло	2...3	2...3	4...6
Кожа, резина	0,5...1	1	2...3
Камни, штукатурка	0,5...1	1	1...3
Пластмасса	3...4	3...6	3...4
Прочее	1...2	3...4	1...2
Отсев (менее 15 мм)	5...7	6...8	4...6

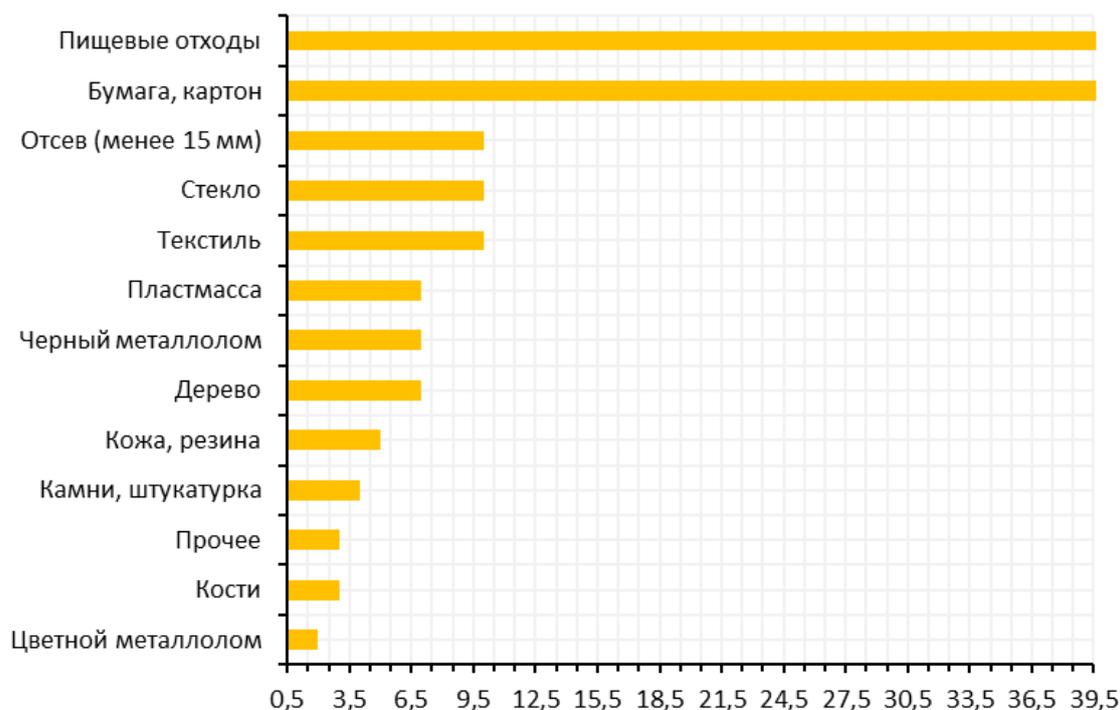


Рисунок 8. Морфологический состав ТБО для северной климатической зоны из МДС 13-8.2000

Данные из МДС 13-8.2000 разделены на 3 климатические зоны: среднюю южную и северную. Предполагаем, что районирование проводилось по благоприятности жизни в различных регионах нашей страны, а также с учетом размещения тех или иных производственных мощностей. Мы видим, что наибольшие показатели пищевых отходов наблюдается в южной климатической зоне, а наименьшие в северной. Остальные показатели не сильно отличаются друг от друга. В данной работе Санкт-Петербург будет

отнесен к северной климатической зоне, поэтому остальные расчеты будут вестись по этим параметрам.

Можно заметить, что предоставляемые данные из трех источников отличаются друг от друга по компонентному составу. Морфологический состав из терсхемы и МДС 13-8.2000 в целом схожи по компонентам, но при этом отличаются по числовым показателям. Наибольшее внимание следует уделить органической части отходов и тому, как разнится её доля. Наименьшая предлагаемая часть органики 22% описана в единой концепции при этом учтена доля садово-парковым отходам, чего нет в других концепциях. В терсхеме органике выделено 27,4%, а в МДС 13-8.2000 этот показатель наибольший и составляет порядка 39%. Данные различия необходимо учитывать при различных выбросах, так как чем больше доля биоразлагаемой органики, тем активнее идет процесс выбросов парниковых газов.

2.5. Полигоны и комплексы по переработке ТКО в Санкт-Петербургской агломерации

Для широких слоев населения Санкт-Петербурга и прилегающих территорий Ленинградской области места расположения проектируемых комплексов по переработке и полигонов по размещению ТКО ассоциируются с объектами, безусловно оказывающими негативное воздействие на окружающую среду.

Такой образ данных объектов сформировался в результате в целом отрицательного многолетнего опыта по их эксплуатации, который в большинстве случаев существенно превосходил проектные параметры в части допустимой массы размещаемых ТКО. Неоднократно в средствах массовой информации упоминались случаи нарушения санитарно-гигиенического и экологического законодательства при эксплуатации ПТО «Новоселки», заводов по механизированной переработке бытовых отходов в пос. Янино и на Волхонском шоссе, д. 116, полигона «Южный», полигона ТКО «Новый Свет» и других.

Одной из основных экологических проблем этих объектов, помимо воздействия на поверхностные, подземные воды, растительность и биоту, является влияние на качество атмосферного воздуха, в том числе в части распространения неприятных запахов, за которое ответственен выделяемый массой ТКО «свалочный» газ, образующийся в процессе разложения захороненных отходов. Важно отметить, что он не только неприятно пахнет, но он также является токсичным газом, основу которого составляет горючий пожароопасный метан.

Непосредственно в границах города Санкт-Петербурга существуют несколько законсервированных свалок, например, «Приморская», а также рекультивируемый полигон ТКО «Новоселки» по адресу: пос. Левашово, Новоселки, д. 18.

Рекультивируемый полигон до сих пор оказывает влияние на атмосферный воздух в Санкт-Петербурге. В первую очередь это связано с тем, что размещенные на нем отходы являются заметным источником метана.

Полигон «Новоселки» функционировал с 1972 года, на нем изначально размещались преимущественно ТКО, а также частично производственные отходы. Ежегодно на полигоне размещалось более 600 тыс. тонн ТКО. Участок для складирования составляет порядка 70 гектаров, высота полигона превышает 40 метров. Вопрос о закрытии и рекультивации переполненного полигона неоднократно поднимался с 2013 года, но окончательно он прекратил принимать отходы только в 2022 году.

В настоящее время важнейшим полигоном ТКО для сферы обращения с ТКО в Санкт-Петербурге – это «Северная Самарка». Карта размещения полигонов и предполагаемых к строительству заводов отражена на рисунке 10.

Одной из важнейших задач Региональной целевой программы по обращению с ТКО в Санкт-Петербурге на период 2012–2020 годов была дегазации крупнейших закрытых мест размещения ТКО (прежде всего, полигон ПТО «Новоселки»). Следует заметить, что задачи по дегазации полигонов ставились еще в 1990 и 2000 годах, но так и не решены до настоящего времени.

Утилизация свалочного газа осуществляется путем его переработки в газопоршневых установках с одновременной выработкой электрической энергии и тепла. Данная технология, являясь технологией в области возобновляемых источников энергии (ВИЭ), широко используется в европейских странах.

В соответствии с п. 7.21 СП 320.1325800.2017 «Полигоны для твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация», для обеспечения пожаро- и взрывобезопасности полигонов ТКО и предупреждения неконтролируемого накопления биогаза в массиве отходов необходимо осуществлять дегазацию массива отходов. Дегазация осуществляется с помощью пассивных или активных систем дегазации. Метод сбора и утилизации биогаза определяется расчетным путем на основании прогнозных моделей образования биогаза (см. рисунок 9) с учетом технико-экономической целесообразности строительства систем. Выбор технических решений и оборудования для дегазации объектов размещения ТКО должен проводиться на основании газогеохимических исследований.

В Российской Федерации практика по активной дегазации полигонов ТКО пока не получила широкого распространения. В качестве примера использования на территории СНГ можно привести 2 станции активной дегазации в Республике Беларусь – станция «Тростенец» и «Северный» (оба проекта реализованы группой компаний ТДФ Экотех).

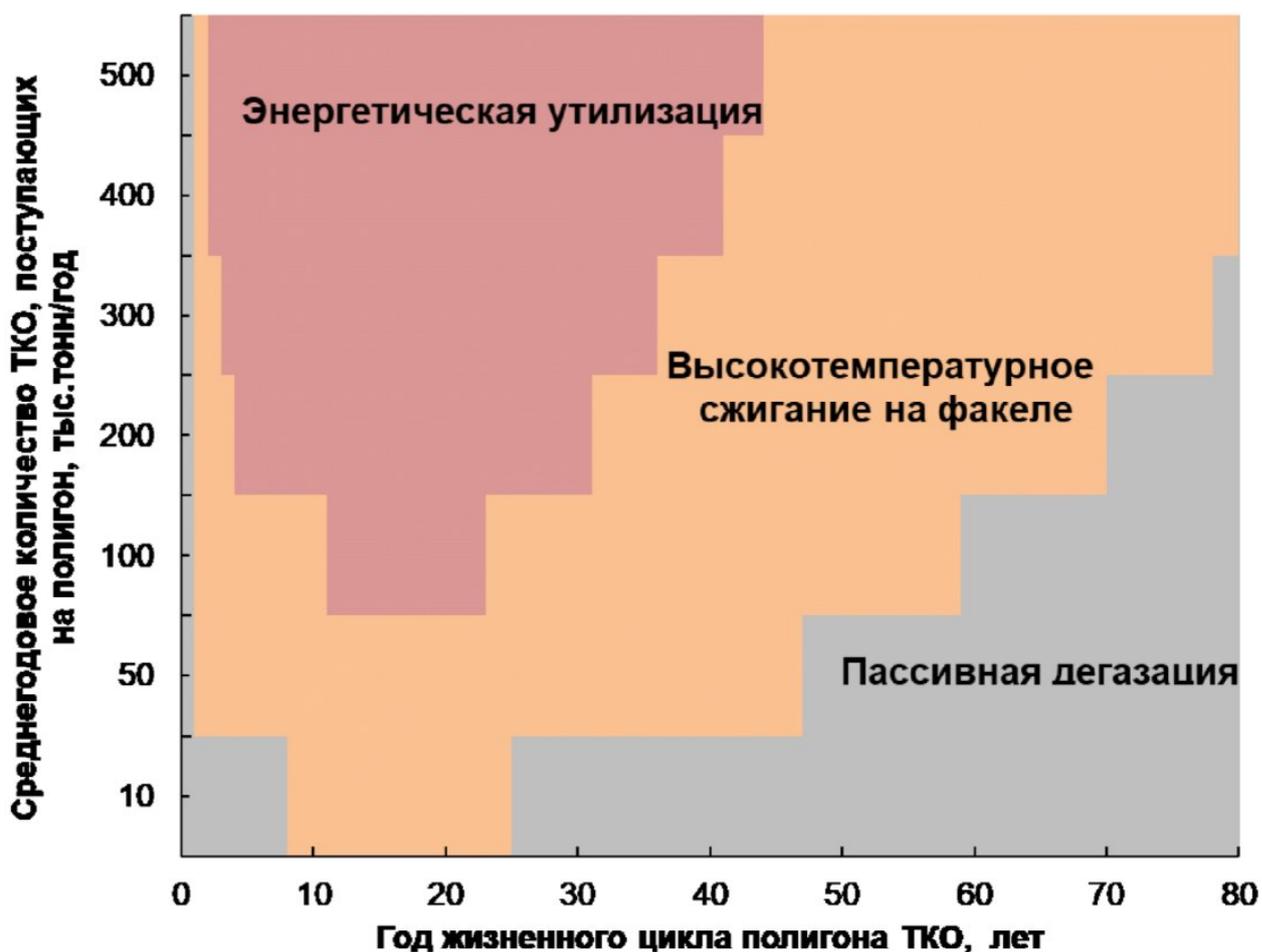


Рисунок 9. Модель образования биогаза в соответствии с СП 320.1325800.2017

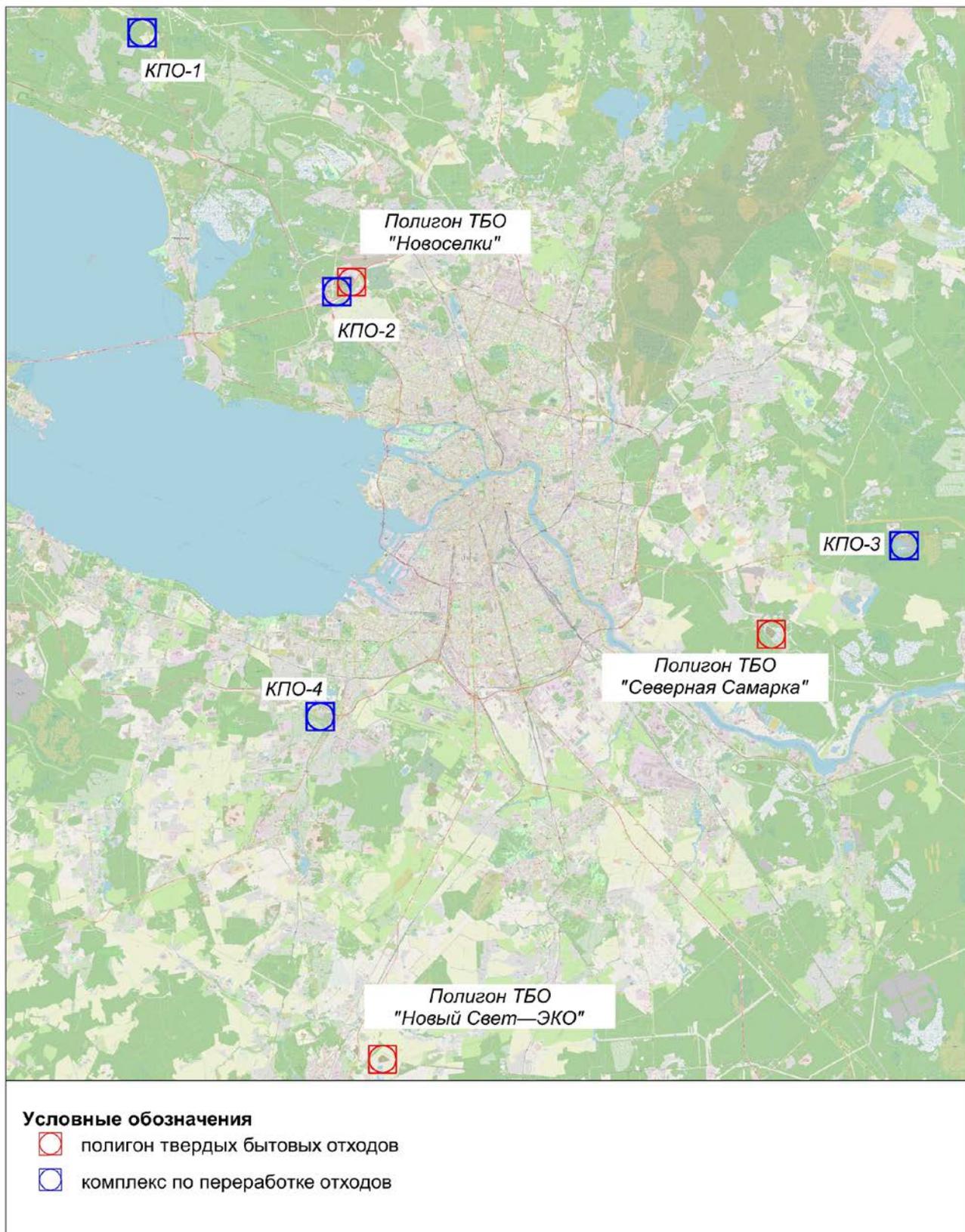


Рисунок 10. Карта размещения полигонов ТБО и КПО по Санкт-Петербургу и Ленинградской области

2.5.1. Санитарная классификация и санитарно-защитные зоны объектов по обращению с отходами

В целях снижения негативного воздействия объектов по обращению с ТКО на здоровье и среду обитания человека от них устанавливаются санитарно-защитные зоны (далее – СЗЗ). СЗЗ обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух (химического, биологического, физического) до значений, установленных гигиеническими нормативами.

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов»,

К классу I (СЗЗ = 1000 м) относятся:

- Объекты по размещению, обезвреживанию, обработке отходов производства и потребления 1-2 классов опасности.
- Объекты по утилизации, обезвреживанию, обработке отходов от 40 тысяч т/год, в том числе, участки по обращению с медицинскими отходами классов Б и В, оборудованные установкой для обезвреживания отходов методом сжигания, пиролиза.
- Утильзаводы для ликвидации трупов животных и конфискатов.

К классу II (СЗЗ = 500 м) относятся:

- Объекты по размещению, обезвреживанию, обработке, токсичных отходов производства и потребления 3-4 классов опасности.
- Объекты по утилизации, обезвреживанию, обработке отходов до 40 тысяч т/год, в том числе, участки по обращению с медицинскими отходами классов Б и В, оборудованные установкой для обезвреживания отходов методом сжигания, пиролиза.
- Объекты размещения твердых коммунальных отходов.

К классу III (СЗЗ = 300 м) относятся:

- Участки для парникового и тепличных хозяйств с использованием отходов после их обезвреживания и (или) утилизации.
- Объекты по обезвреживанию, утилизации органических отходов, без навоза и фекалий, путем компостирования.

2.6. Характеристика климатического режима Санкт-Петербурга

Санкт-Петербург расположен на северо-западе России и имеет умеренно-континентальный климат с влиянием морского. Частая смена воздушных масс в этом регионе определяет непостоянство погоды. Морские воздушные массы поступают с запада, юго-запада или северо-запада благодаря перемещению атлантических циклонов через северо-западные районы России. Циклоны приносят облачную, ветреную погоду и осадки. Зимой их действие проявляется в адвекции тепла, а летом, наоборот, адвекции холода. С востока, юга или юго-востока приходит сухой континентальный воздух, устанавливающий антициклональный тип погоды: малая облачность и отсутствие осадков, летом жаркая, а зимой холодная погода. С севера и северо-востока, особенно со стороны Карского моря, идет заток сухого и очень холодного арктического воздуха, формирующегося надо льдом. Вторжения арктических воздушных масс сопровождаются наступлением ясной погоды и резким понижением температуры воздуха. В сформировавшихся в этих воздушных массах областях повышенного давления могут наблюдаться заморозки даже летом, а зимой – наиболее сильные морозы. Разнообразие синоптических процессов и частая смена воздушных масс являются причиной больших межсуточных колебаний метеопараметров. Перепады температуры воздуха могут значительно превышать амплитуду суточных колебаний и нередко достигают $\pm 20^{\circ}\text{C}$ и более. Кроме резких изменений погоды на территории области наблюдаются многие опасные метеорологические явления: сильные ветры, в т.ч. шквалы и смерчи, снегопады и метели, гололед, туман, сильные морозы и жара, кратковременные интенсивные ливни и продолжительные дожди, грозы, град, лесные пожары, засуха и наводнения.

Внутригодовое распределение температуры воздуха в Санкт-Петербурге отражено на рисунке 11. Среднегодовая температура воздуха составляет $6,3^{\circ}\text{C}$.

Лето в Санкт-Петербурге короткое, но довольно теплое и влажное. Самый теплый месяц – июль, средняя температура воздуха которого составляет около $+17^{\circ}\text{C}$, но может достигать $+30^{\circ}\text{C}$ в жаркие дни. Осадков в летний период много, преимущественно в виде кратковременных дождей и гроз. Относительная влажность воздуха снижается до 70–75%. На рисунке 13 рассмотрена температура центрального месяца летнего сезона – июля. Выявлен положительный тренд, увеличение температуры составит $0,4^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Зима в Санкт-Петербурге длинная, холодная и влажная. Самый холодный месяц – февраль – средняя температура воздуха составляет -5°C , но может опускаться до -30°C в морозные дни. Относительная влажность составляет около 80-85%. На рисунке 13 рассмотрена температура центрального месяца зимнего сезона – января. Выявлен отрицательный тренд, уменьшение температуры составит $0,3^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Осень и весна в Санкт-Петербурге довольно короткие и прохладные. Средняя температура в этих сезонах колеблется в пределах $+5^{\circ}\text{C}$. Осадки в этих сезонах также весьма обильны, с частыми дождями и снегопадами. На рисунке 13 рассмотрены центральные месяца весеннего и осеннего сезонов. Выявлены тренды. Повышение температуры в апреле составит $0,3^{\circ}\text{C}/10$ лет, в октябре – $0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Внутригодовое распределение относительной влажности воздуха показано на рисунке 11. Относительная влажность воздуха в Санкт-Петербурге варьируется в диапазоне от 65% до 80% в зависимости от сезона. Наименьшее значение относительной влажности воздуха достигается в весенний период – с марта по май, однако все еще остается достаточно высокой, в районе 65–80%. Наибольшие значения относительной влажности воздуха достигаются в зимние месяцы и не опускаются ниже 80%.

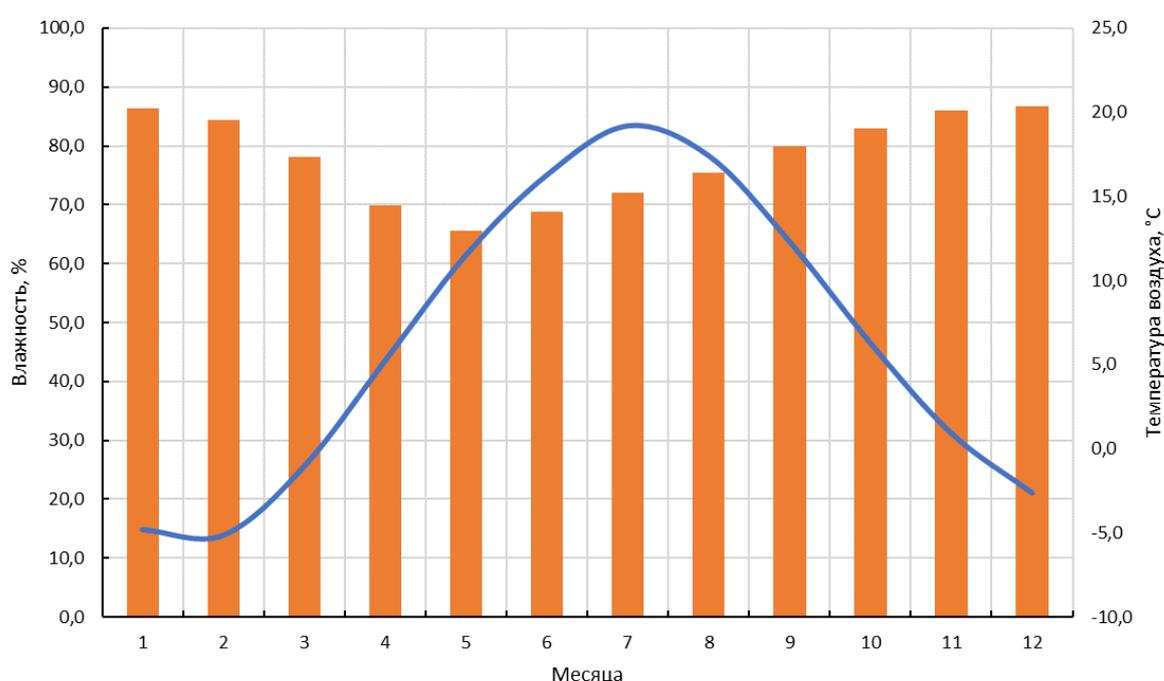


Рисунок 11. Внутригодовые значения средней приземной температуры воздуха (синий график) и относительной влажности воздуха (оранжевая диаграмма)

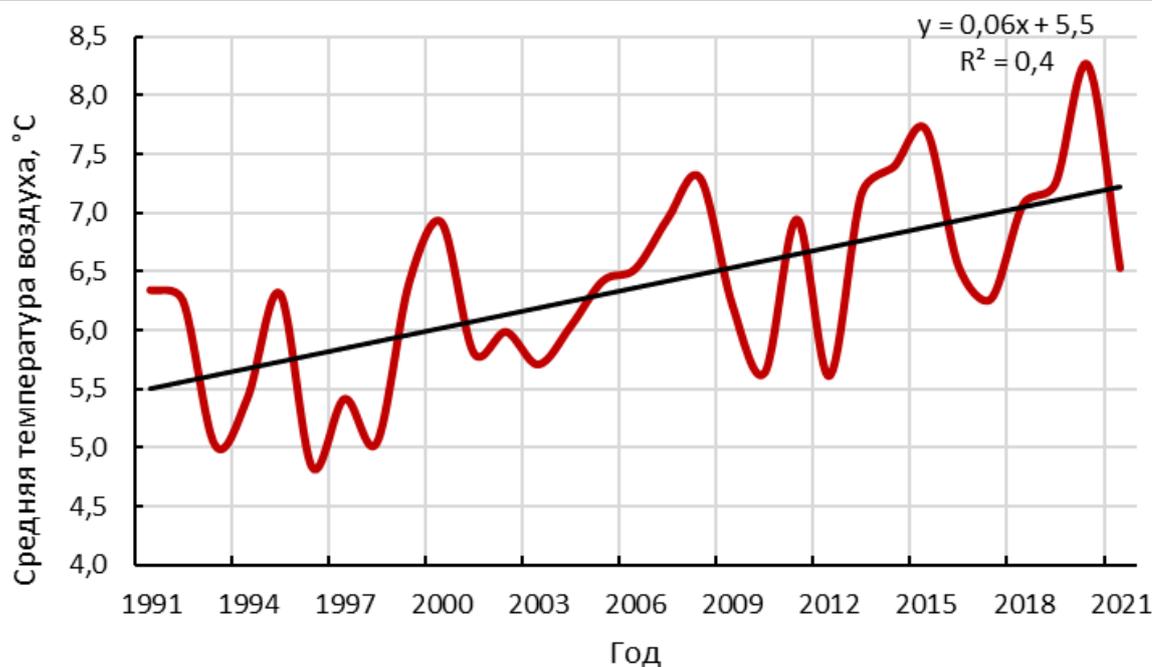


Рисунок 12. Динамика изменения среднегодовых значений приземной температуры воздуха за 1991–2021 гг.

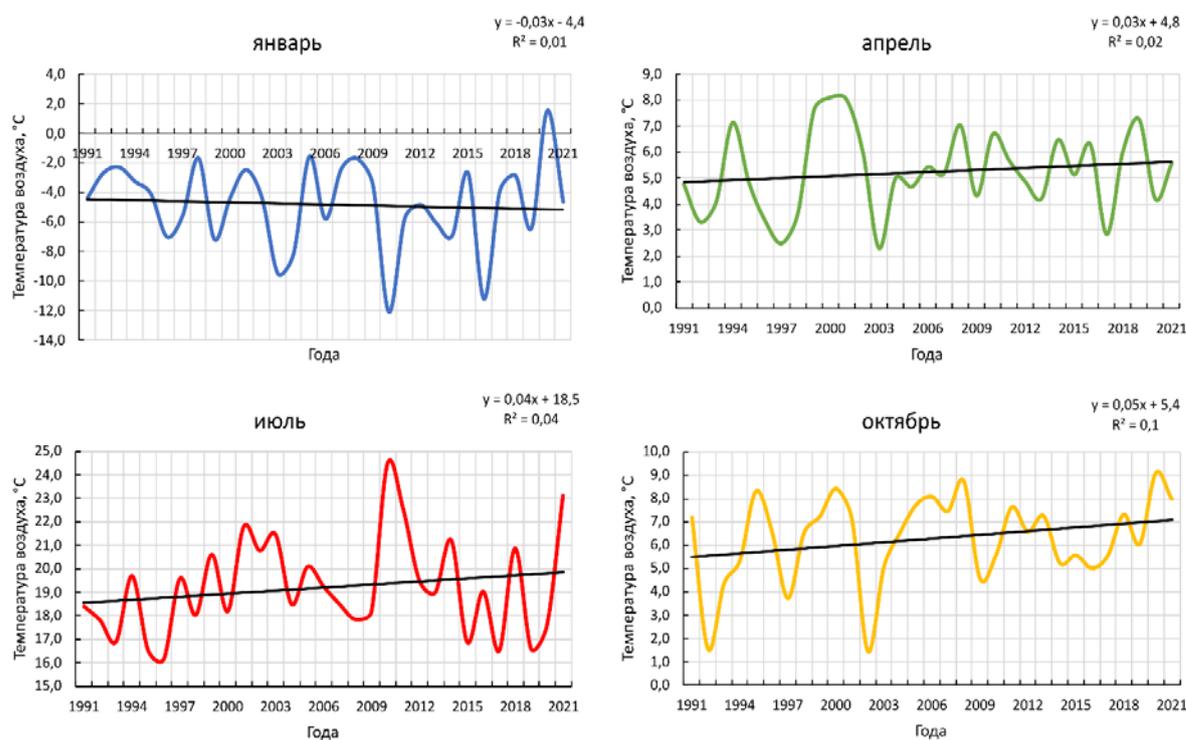


Рисунок 13. Динамика изменения приземной температуры воздуха в центральные месяцы сезона за 1991–2021 гг.

Внутригодовое распределение осадков в Санкт-Петербурге отражено на рисунке 14. Выпадение осадков в Санкт-Петербурге определяется, главным образом, интенсивностью циклонической деятельности. В течение года осадки выпадают неравномерно: большая их часть (51 %) приходится на теплый период (май-сентябрь) и только 49 % – на холодный

(октябрь-апрель). В среднем за год выпадает 667,7 мм осадков. Максимум осадков наблюдается в августе 90,9 мм, а минимум в марте – 37,0 мм. Однако в отдельные периоды эта закономерность может нарушаться, и как максимум, так и минимум могут сдвигаться по месяцам.

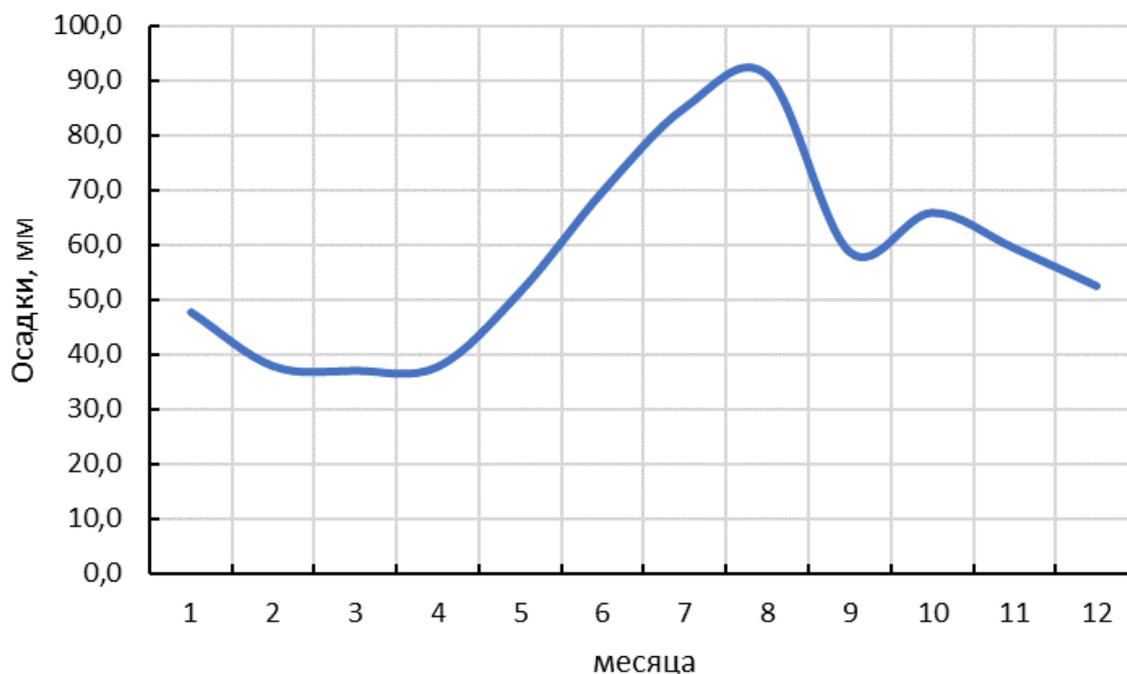


Рисунок 14. Внутригодовое распределение осадков в Санкт-Петербурге

Осадки за зимний период имеют тенденцию к увеличению. Увеличение осадков составляет 3 мм/10 лет (см. рисунок 15). Также изменяются осадки в летний период, увеличение составляет 6 мм/10 лет. За весенний и осенний периоды изменения незначительные. За осенний период осадки имеют тенденцию к снижению, уменьшение составляет 2 мм/10 лет. В то время, как весной, осадки едва ли увеличиваются, изменение на 0,7 мм/10 лет. Для нашей работы наибольший интерес следует уделить изменению режима увлажнения в летний период, так как именно в это время сочетание температурного и влажностного факторов оптимальны для активного разложения и образования биогаза.

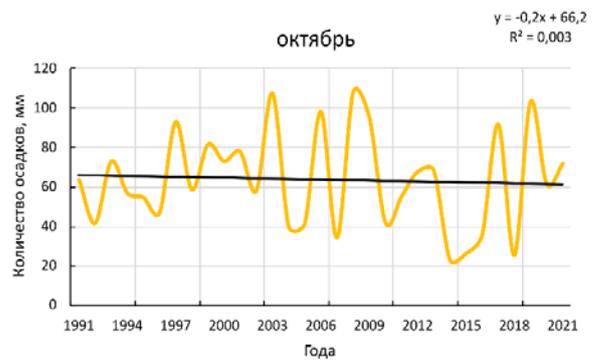
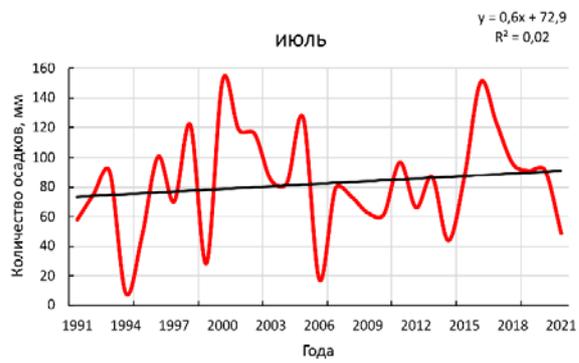
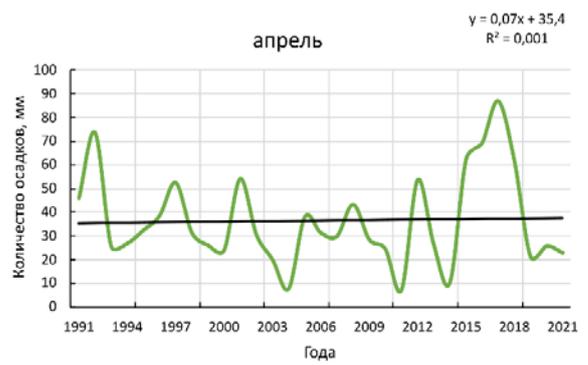
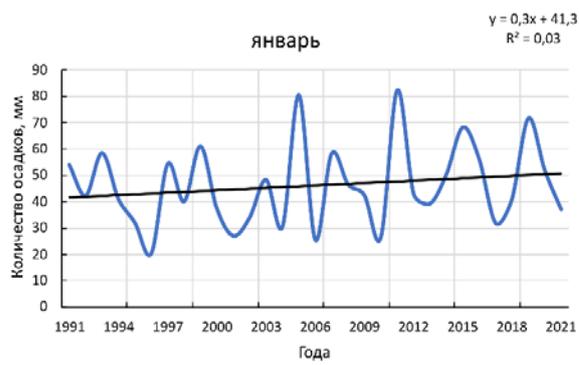


Рисунок 15. Динамика изменения осадков в центральные месяца сезонов за 1991–2021 гг.

Глава 3

4.1. Исходные данные

Для анализа климатических рядов был использован массив с «ВНИИГМИ-МЦД» [2]. Массив представляет собой перечень баз данных, определенных на основе требований Глобальной системы наблюдений за климатом, и включает основные климатические параметры. Массив находится в открытом доступе, регулярно пополняется и расширяется.

Для анализа образующихся твердых бытовых отходов использовались данные, предоставленные в территориальной схеме обращения с отходами производства и потребления в г. Санкт-Петербург. Данные взяты на 2020 год. Данные о перерабатываемых мощностях «Завод по механизированной переработке бытовых отходов», взяты из официальных документов регионального оператора.

В качестве картографической подосновы использовалась карта OSM STANDART – Open Street Map.

Данные о территориальном планировании Санкт-Петербурга и Ленинградской области были взяты из Публичной Кадастровой Карты Росреестра [14], а также из Региональной информационной системы Санкт-Петербурга [18].

Данные о выбросах вредных веществ от объектов обращения с ТКО получены по данным реестра санитарно-эпидемиологических заключений Роспотребнадзора на проектную документацию (<http://fp.crc.ru/>).

4.2. Используемые методики для расчетов

4.2.1. Расчет выбросов парниковых газов

В данной работе было использовано две методики по расчету выбросов парниковых газов от полигона ТКО. Принципиальное отличие двух методик друг от друга заключается в том, что берется за основу для расчета выброса газов: климатические факторы и период разложения или же морфологический состав отходов. Таким образом, можно оценить вклад того или иного фактора, а также сравнить два концептуально разных подхода расчета выбросов газов.

Первая методика – Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов, созданная ведущими институтами нашей страны (Москва, 2004). Методика содержит примерный морфологический состав и основные характеристики отходов, вывозимых на полигоны, поэтапную временную характеристику процессов, происходящих

в толще отходов, захороненных на полигонах, способы определения количественного и качественного состава выделяемого полигонами биогаза, методы расчета удельных и валовых выбросов образующегося биогаза в целом и по компонентам.

Уделяется также отдельное внимание климатическим условиям, которые оказывают непосредственное воздействие на выброс газа. Биогаз образуется неравномерно в зависимости от времени года. При отрицательных температурах процесс сбраживания органической части отходов прекращается до наступления более теплого периода года, когда температура воздуха устойчиво держится выше 0°C. Поэтому для расчёта по этой методике необходимо определить безморозный период и среднюю температуру воздуха за него.

Вторая методика – IPCC Inventory Software (UNFCCC). Программное обеспечение межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) для инвентаризации реализует Руководящие принципы МГЭИК 2006 г. для национальных кадастров парниковых газов. В данной работе используется программное обеспечение инвентаризации МГЭИК (версия 2.83) – Waste Reduction Model (WRM) – для расчета выбросов биогаза от полигонов ТБО [19]. Программа реализует метод разложения первого порядка для оценки выбросов метана с мест захоронения твердых отходов. Подробную информацию о методе можно посмотреть в Руководстве МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов 2006 года, Том 5, глава 3. Необходимые данные для расчета:

1. Данные о деятельности населения и валовом внутреннем образовании ТКО на душу населения.
2. Данные о количестве утилизируемых и захораниваемых отходах.
3. Морфологический состав отходов, таких компонентов как: пищевые, садово-парковые, древесина, текстиль, бумага, пластик и другие инертные материалы (стекло, металл, бой кирпича).
4. Данные по управляемым и неуправляемым ТКО.

Климатические показатели выбираются автоматически, исходя из климатической зоны, в которой находится страна. Климатическое районирование, используемое в методике, представлено в таблице 8.

Таблица 8. Климатическое районирование, лежащее в основе расчета выбросов вредных веществ в атмосферу

	Среднегодовая температура воздуха	Среднегодовое количество осадков	Потенциальная эвапотранспирация
Сухой умеренный климат	0 - 20°C	-	<1
Влажный умеренный климат	0 - 20°C	-	>1
Сухой тропический климат	> 20°C	<1000 mm	-
Влажный и очень влажный тропический климат	> 20°C	>1000 mm	-

Климатические параметры выбираются в соответствии с ближайшей к полигону метеорологической станцией.

Поскольку площадной разброс первых двух климатических зон очень большой, а выпадение осадков неоднородно по территории, то осреднение осадков по всей зоне являлось бы нерепрезентативным показателем. Поэтому для оценки режима увлажнения используют потенциальную эвапотранспирацию. Термин эвапотранспирация чаще всего используется в агроклиматологии, но сама природа процесса не противоречит применению данного показателя для области отходов. Обратимся к определению, эвапотранспирация – это количество влаги, переходящее в атмосферу в виде пара в результате транспирации (процесс испарения воды растением) и испарения с поверхности почвы в течение определенного времени [21]. Потенциальная эвапотранспирация представляет собой то количество влаги, которое могло бы испариться путем эвапотранспирации, если климатические условия при этом были бы оптимальными. В данной методике транспирацию рассматривают не с поверхности растений, а с поверхности отходов. Оценить данный показатель расчетными методами крайне сложно, зачастую его определяют инструментально непосредственно над конкретным растительным покровом. МГЭИК предлагает оценить этот показатель через отношение среднегодовой температуры воздуха к среднегодовому количеству осадков. Таким образом, разброс этого показателя относительно 1 показывает степень засушливости территории. Санкт-Петербург относится к зоне с умеренно влажным климатом.

4.2.2. Методы обработки метеорологических данных

4.2.2.1. Оценка значимости линейных трендов

Оценка значимости линейных трендов проводилась с помощью метода И.И. Поляка. Метод предполагает, что линейный тренд является статистически значимым с вероятностью 95%, если $|a| > 2\sigma_a$. Среднее квадратическое отклонение $|a|$ рассчитывается по формуле 1 (И.И.Поляк, 1975).

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{3\sigma^2}{k(k+1)(2k+1)}} \quad (1),$$

где: $k = 0.5 n$, n – длина ряда, σ^2 – дисперсия исходного ряда.

Среднюю квадратическую ошибку коэффициента корреляции линейного тренда рассчитывают по формуле (2).

$$\sigma_r = \frac{(1-r^2)}{\sqrt{(n-1)}} \quad (2).$$

Коэффициент корреляции должен быть больше удвоенной средней квадратической погрешности при уровне значимости 5%, и больше утроенной средней квадратической погрешности при уровне значимости 1%.

4.2.2.2. Оценка степени увлажнения территории

Для оценки степени увлажнения территории использовались индексы увлажнения. Они основываются на том, что обеспеченность влагой изучаемого района находится в линейной зависимости от количества выпадаемых осадков и в обратной зависимости от испаряемости, характер которой определяется термическим фактором и режимом увлажнения. Несмотря на то, что данные индексы активно применяются в агроклиматологии, где основным предметом исследования является растение, мы можем допустить использование описываемых индексов, заменяя предмет исследования на отходы.

Первый рассмотренный индекс – гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК), предложенный Г.Т. Селяниновым [20]. Он характеризует уровень влагообеспеченности территории. Индекс чувствителен к засушливым условиям, характерным для изучаемого климатического режима, обладает достаточной гибкостью и может использоваться в применениях месячного и декадного масштабов. Однако, по мнению Шихлинского Э.М. [25], коэффициент отражает степень возмещения фактическими осадками количества влаги, которое соответствует теплоэнергетическим ресурсам климата. В нем используются сезонные величины, в то время как накопление влажности в отходах происходит в течение года, при этом осадки выпадают неравномерно.

Поэтому при оценке влагообеспеченности внутригодовых периодов индекс ГТК не учитывает перераспределение влаги [23].

Расчётная формула:

$$\text{ГТК} = \frac{r}{0,1 \cdot Z_{t>10^{\circ}\text{C}}} \quad (3), \text{ где}$$

$Z_{t>10^{\circ}\text{C}}$ – сумма температур за период с температурой больше 10°C ,

r – сумма осадков за тот же период.

Интерпретация полученных результатов проводилась в соответствии с предложенными шкалами (см. табл. 9).

Таблица 9. Районирование территории в соответствии с индексом ГТК

	Избыточное увлажнение	Оптимальное увлажнение	Недостаточное увлажнение	Сухая зона
ГТК	> 2,0	1,5	1,0	0,5 и менее

Таблица 10. Граничные значения засухи.

	Очень сильная	Сильная	Средняя	Слабая	Нет
ГТК	0 – 0.19	0.20 – 0.39	0.40 – 0.60	0.61 – 0.75	> 0.76

Также использовался показатель годового увлажнения Д. И. Шашко [24], который равен отношению суммарного годового количества осадков к годовой сумме среднесуточных дефицитов влажности воздуха.

Расчетная формула:

$$\text{Md} = \frac{r}{Z_d} \quad (4), \text{ где}$$

r – сумма осадков за год,

Z_d – сумма среднесуточных дефицитов влажности за год (показатель испаряемости).

Интерпретация полученных результатов проводилась в соответствии со следующим делением:

Таблица 11. Показатели увлажнения

	Соответствие осадков и испаряемости	Осадки превышают испарение	Избыточное увлажнение	Недостаточное увлажнение	Крайне засушливые условия
Md	0.45	>0.45	> 0.60	<0.45	менее 0.15

4.2.2.3. Оценка безморозного периода

Календарные сезоны года не совпадают с естественными фазами развития климатических процессов. Из года в год невозможно определить точную дату смены теплого и холодного сезона, продолжительность этих периодов, их окончание. За теплый период принимается период с температурой воздуха выше 0°C . Для оценки средней

продолжительности этого периода рассматривался устойчивый переход температуры воздуха через 0°C. Для этого анализировались весенняя и осенняя даты устойчивого перехода через 0°C. Весенняя дата устанавливается, когда положительные среднесуточные температуры воздуха по сумме превышают предыдущие суммы (по модулю) отрицательных среднесуточных температур. Осенняя дата устанавливается, когда отрицательные среднесуточные температуры воздуха по сумме (по модулю) превышают предыдущие суммы положительных среднесуточных температур. Данные рассматривались за период с 1991–2021 гг. За средний безморозный период принимается среднее арифметическое из продолжительности данного периода в днях за каждый год. Также была рассчитана ежегодная средняя температура воздуха за безморозный период и рассчитана норма температуры воздуха безморозного периода для 1991–2021 гг.

4.2.3. Методы расчета вредных выбросов от объектов обращения с ТКО

4.2.4. Расчёт рассеивания вредных веществ от объектов обращения с ТКО

Для сравнения различных технологий обращения с ТКО по уровню воздействия на качество атмосферного воздуха было решено выполнить расчеты выбросов вредных веществ и рассеивания от них в атмосферном воздухе.

Расчёт рассеивания проводился с помощью Унифицированной программы расчёта загрязнения атмосферы (УПРЗА «Эколог»), реализующей Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утвержденные приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года № 273. Разработчиком УПРЗА «Эколог» является специализированная фирма «Интеграл» (<https://integral.ru/>) (далее – Методы).

УПРЗА «Эколог» позволяет выполнять расчеты рассеивания выбросов загрязняющих веществ (далее – ЗВ) в атмосферном воздухе в двухметровом слое над земной поверхностью на расстоянии не более 100 км от источника выброса, а также оценивать вертикальное распределение концентраций поллютантов.

УПРЗА «Эколог», реализующая Методы, позволяет рассчитать поля:

- максимальных разовых концентраций ЗВ, соответствующих сочетанию неблагоприятных метеорологических условий, в том числе, опасной скорости ветра, и неблагоприятных условий выброса ЗВ в атмосферный воздух, то есть такого сочетания мощностей и других параметров выброса ЗВ в атмосферный воздух, при котором в условиях соблюдения промышленным предприятием установленного режима работы достигаются максимальные значения максимальных приземных концентраций;

- безразмерных концентраций ЗВ в атмосферном воздухе групп веществ комбинированного вредного действия (полной суммы, неполной суммы);
- средних концентраций ЗВ в атмосферном воздухе, соответствующих длительному (сезон, год) времени осреднения, в частности, среднегодовых, концентраций ЗВ в атмосферном воздухе.

В результате расчета можно: определить нормативы выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, обосновать ориентировочные размеры санитарно-защитных зон, оценить воздействия намечаемой хозяйственной или иной деятельности на качество атмосферного воздуха.

Расчет проводился для двух технологий обращения с отходами: полигон по размещению ТКО (площадной источник загрязнения атмосферного воздуха), объекты по утилизации, обезвреживанию, обработке ТКО (точечный источник).

При выполнении расчета рассеивания учитывались следующие исходные данные: местоположение объекта, выбросы вредных веществ (г/с и т/г) от него, климатические параметры в месте расположения, градостроительная характеристика окружающей территории, расчетная площадка и расчетные точки. Климатические данные для расчета рассеивания отражены на рисунке 16.

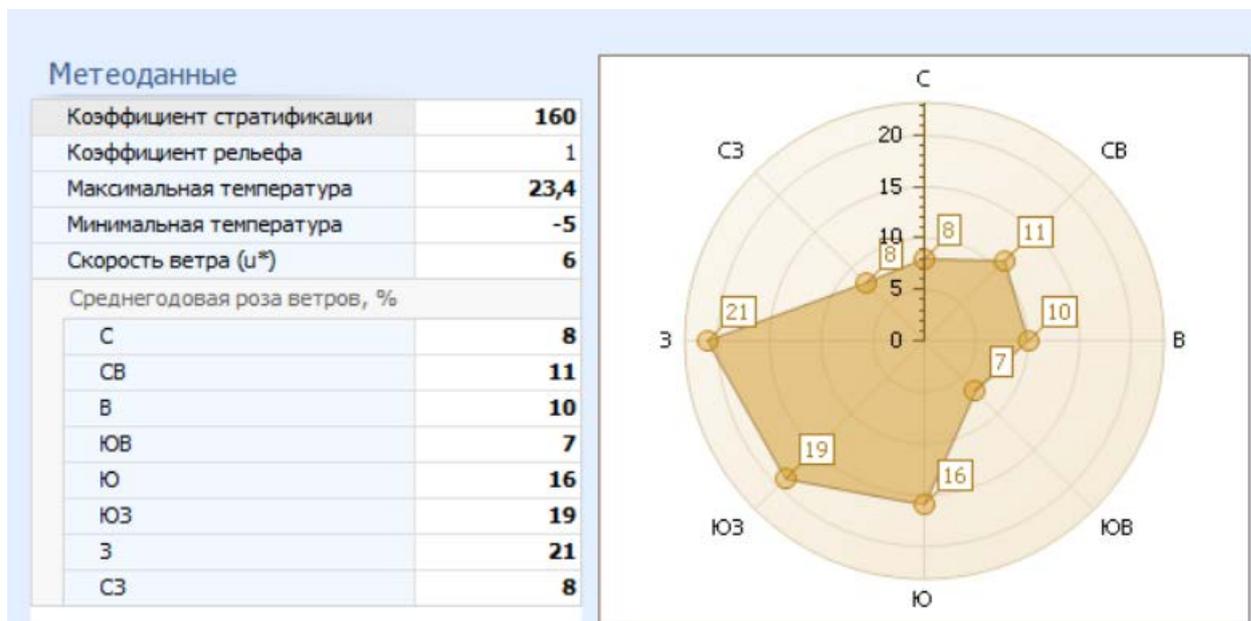


Рисунок 16. Климатические параметры, принятые в расчете рассеивания

4.3. Результаты

На рисунке 17 представлена среднегодовая продолжительность безморозного периода за период с 1991–2021 гг. Прежде всего, обращает на себя внимание очень высокая изменчивость временных рядов. Амплитуда колебаний составляет 135 дней, то есть более 3 месяцев. Самый непродолжительный период (206 дней) наблюдался в 1998 году, когда устойчивый переход через 0 весной наступил 16 апреля, а осенью – 8 ноября. Самый продолжительный период (341 день) был отмечен в 2020 году, тогда не было отмечено устойчивого перехода температуры, так как зимние температуры продолжительно не устанавливались ниже 0°C. Средняя температура воздуха за зимние месяцы в 2020 году составила – 0,4°C, аномально теплым стал январь, средняя температура воздуха которого составила 1,5°C.

Во временном ряду среднегодовой продолжительности безморозного периода отчетливо выражен положительный линейный тренд, который позволяет не только оценить общую изменчивость временного ряда, но и характеризует средние многолетние условия для конкретного периода. По тренду в 1991 году продолжительность безморозного периода составила 231 день, а в 2021 году – 277 дней, таким образом данный период в среднем увеличился на 46 дней. Средняя продолжительность безморозного периода за 30 лет составила 256 дней.

Анализируя осенние даты перехода температуры через 0°C, можно заметить, что за прошедшие 30 лет наступление зимы стало происходить значительно позднее, что и способствует увеличению безморозного периода. Это также было показано в работе В.Н. Малинина [12], чем позже происходит переход через 0°C и чем длиннее осень, тем короче зима. Для нас подобная динамика имеет немаловажную роль, потому что изменение продолжительности безморозного периода находится в прямой зависимости с периодом активного разложения биогаза.

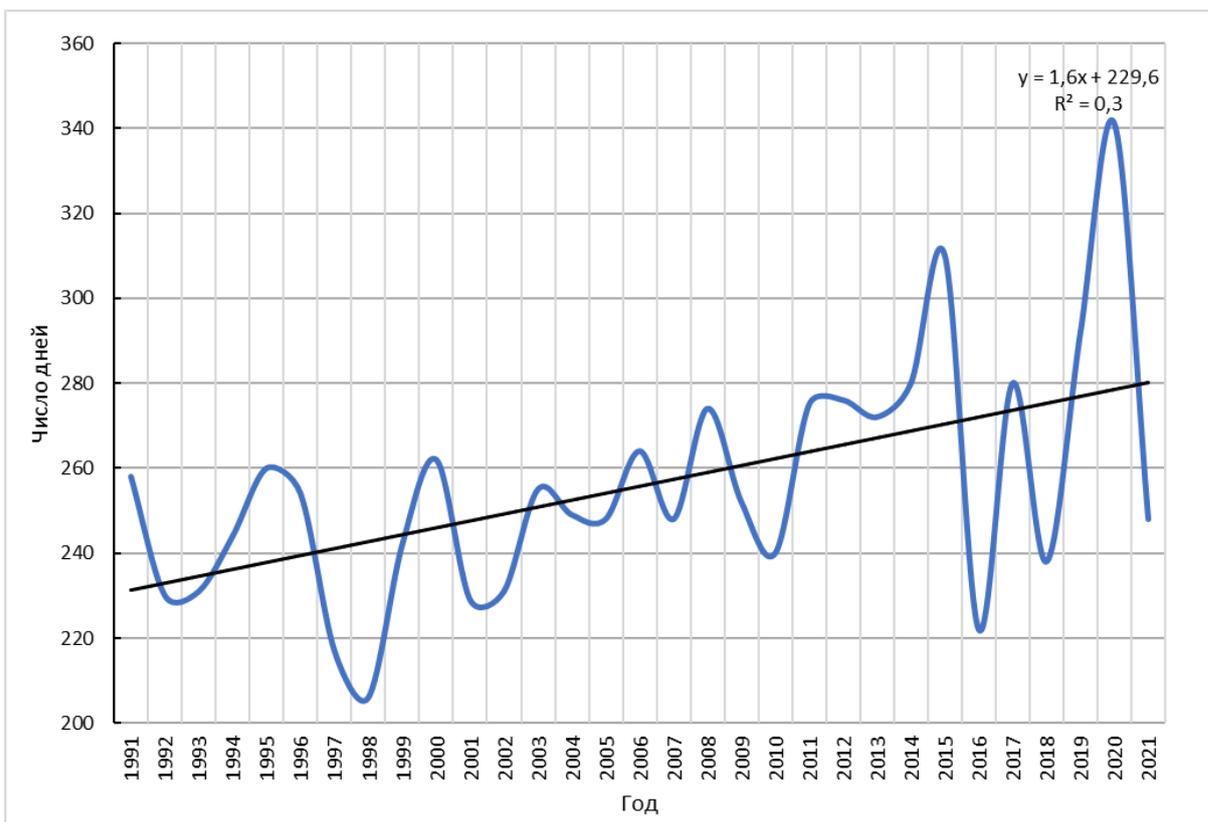


Рисунок 17. Продолжительность безморозного периода за 1991-2021 гг.

Что касается среднесуточной температуры воздуха за безморозный период (см. рисунок 18), она также обладает большой изменчивостью. Амплитуда колебаний составляет $4,3^{\circ}\text{C}$, средняя температура воздуха безморозного периода за 30 лет составляет $11,1^{\circ}\text{C}$. С 2015 года наблюдается большая изменчивость средней температуры воздуха безморозного периода, но несмотря на это тренд практически отсутствует, и он практически незначим. Это позволяет сделать вывод о том, что безморозный период не становится теплее. Данный вывод также крайне важен для наших исследований, так как, чем выше температура данного периода, тем активнее протекают процессы разложения органической части ТКО.

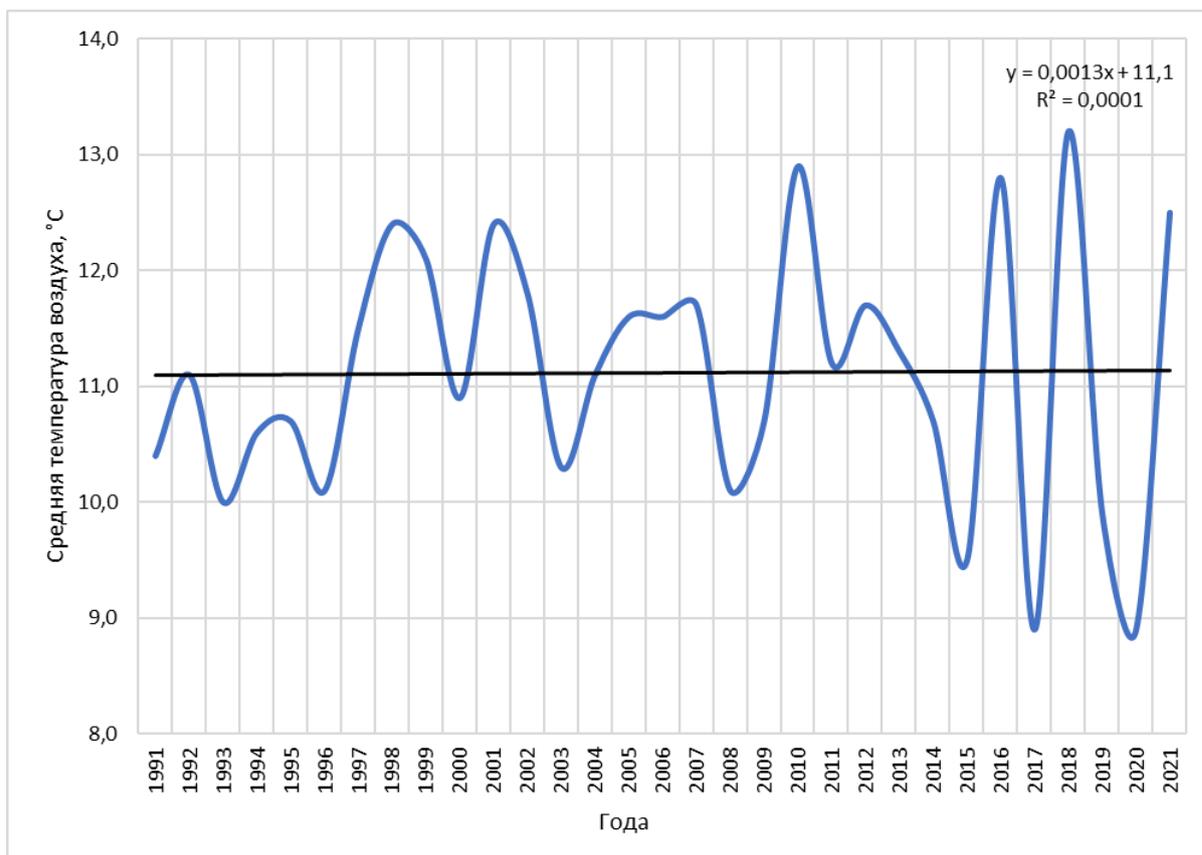


Рисунок 18. Среднесуточная температура воздуха безморозного периода за 1991-2021 гг.

Межгодовая изменчивость ГТК отражена на рисунке 19. В целом этот показатель для станции Санкт-Петербург колеблется в диапазоне от 2 до 1, что говорит об оптимальном увлажнении территории. ГТК наблюдался больше 2, что соответствует избыточному увлажнению, в 1998, 2003, 2007 годах. Недостаточное увлажнение, показатель ГТК <1, территории также отмечалось в 1992 и 2006 годах. При этом в 1999 году ГТК был минимален – ниже 0.7. В этом году наблюдались относительно низкий уровень осадков (127мм) за период сумм температур выше 10°C (равной 2120,3°C).

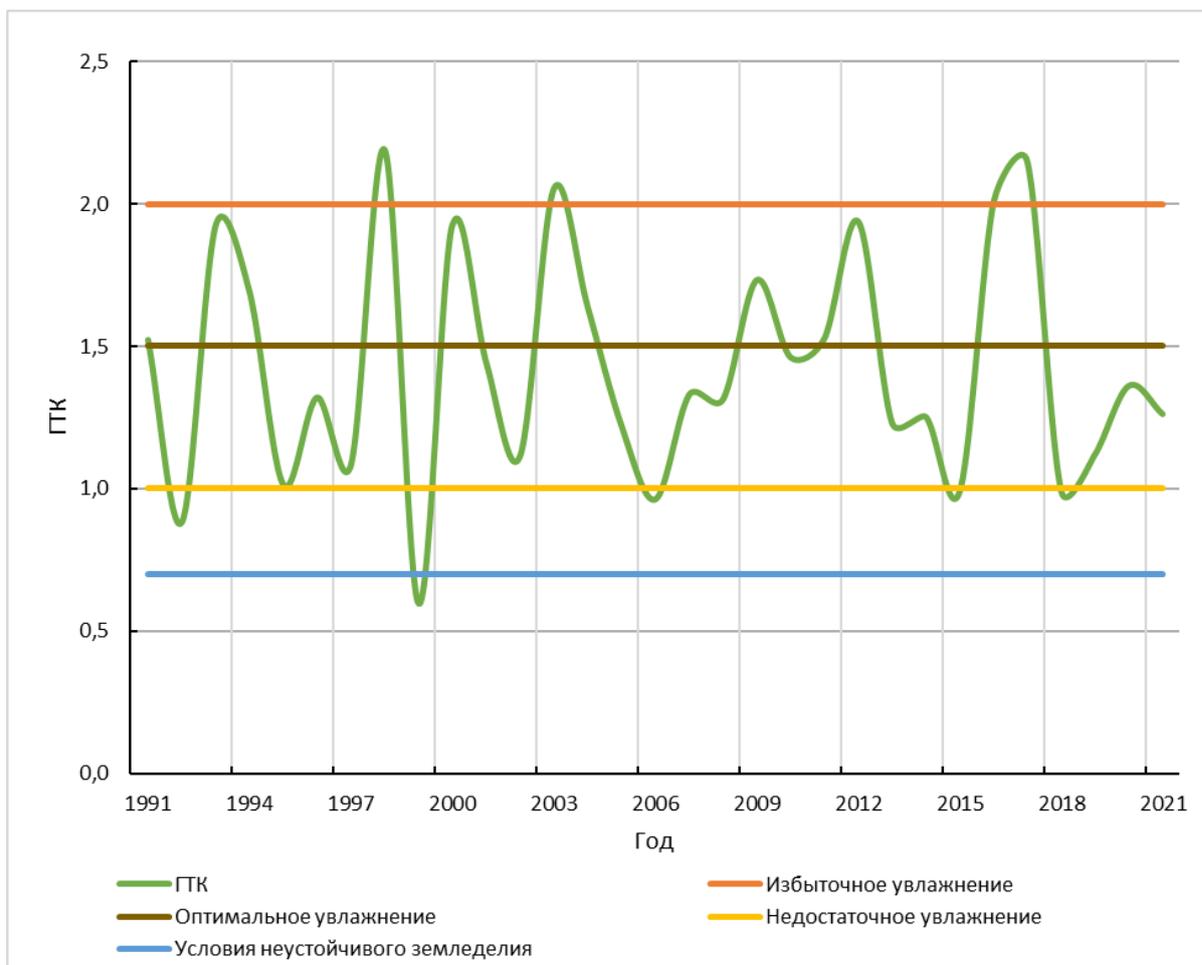


Рисунок 19. Межгодовая изменчивость ГТК за период 1991-2021 гг.

Гидротермический коэффициент был посчитан для летних месяцев: июнь, июль и август. Его распределение представлено на рисунке 20. Показатель ГТК для июня имеет тенденцию к уменьшению ($0,2^{\circ}\text{C}/10$ лет), что свидетельствует о том, что данный месяц становится более засушливым. Особенно ярко эта тенденция проявляется с 2011 по 2021 гг. Наибольший ГТК в июне наблюдался в 1998 году и составлял 3,1. Года с избыточным увлажнением в июне – 1998, 2004, 2009. Прирост ГТК в межгодовой изменчивости для июля незначителен. В среднем показатель колеблется в диапазоне 2–1, что гарантирует оптимальное увлажнение. Но при этом наблюдается частая повторяемость засух, в 1994, 1999, 2006, 2014, 2021 годах. Также наблюдались года с избыточным увлажнением – в 1998, 2000, 2005 и 2016 годах. Минимум достигался в 1994г. и был равен 0,1, максимум в 2000 г. и был равен 2,7. В августе, как и в июне, можно отметить тенденцию к увеличению ГТК, равную $0,2^{\circ}\text{C}/10$ лет. Показатель имеет сезонных характер. В среднем можно выделить период в 4 года. В среднем находится в диапазоне между 1 и 2. Но при этом чаще достигаются условия избыточного увлажнения, например в 1993, 1998, 2003, 2009, 2012, 2016, 2021 годах. Засушливые периоды отмечаются реже, лишь в 1997 году показатель в августе был меньше 0,7 и составлял 0,5.

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что наиболее активные периоды разложения биогаза могут приходиться на июль и август, тем более что температура воздуха в августе в городе Санкт-Петербург наибольшая.

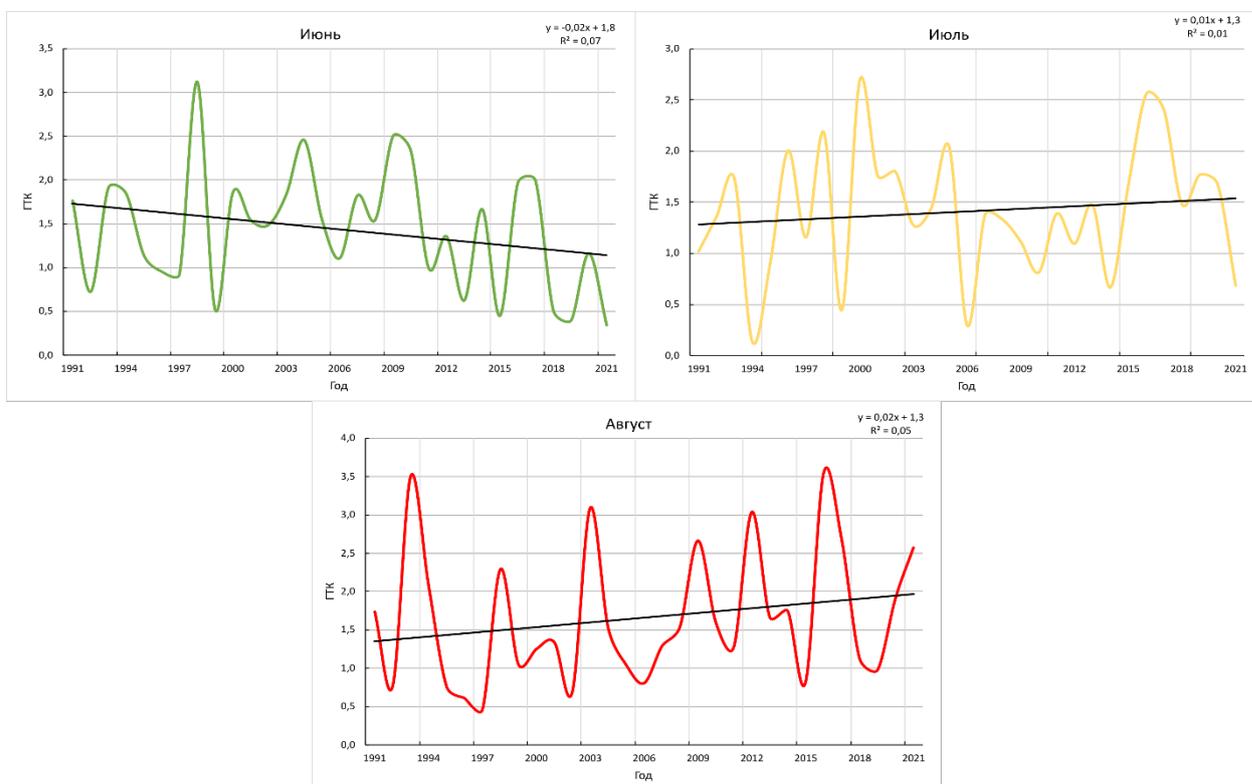


Рисунок 20. Изменения ГТК в летний сезон за период 1991-2021 гг.

На рисунке 21 представлен среднегодовой ход индекса Шашко. Мы можем отметить, что Санкт-Петербург находится в зоне избыточного увлажнения. При этом степень увлажненности территории за последние тридцать лет уменьшается, тренд отрицательный ($-0,3/10$ лет). Рассмотрим за счет какого фактора происходит уменьшение индекса. На рисунках представлены среднегодовой ход осадков и среднегодовой суммы дефицитов влажности. Дефицит влажности воздуха определяет величину испарения с подстилающей поверхности, величину излучения атмосферы и во многом – условия транспирации растений (Будыко, 1977). Для уменьшения индекса Шашко, скорость увеличения дефицита влажности должна быть больше, чем скорость изменения осадков. Это и продемонстрировано на рисунках 22 и 23: можно отметить положительные тренды по обеим характеристикам, при этом прирост составляет 8,5 мм/10 лет и 9 мб/10 лет соответственно. Исходя из рисунка 24, мы видим, что относительная влажность воздуха понижается, в то время как дефицит влажности растет, это свидетельствует о том, что испарение с поверхности почвы и отходов возрастает. Несмотря на то, что количество осадков в Санкт-Петербурге неуклонно растет, видно, что показатели увлажнения

уменьшаются. Это позволяет сделать вывод о том, что влажность органической биомассы отходов, находящейся под воздействием окружающей среды, будет незначительно уменьшаться или не изменяться вовсе, но главное, что не расти.

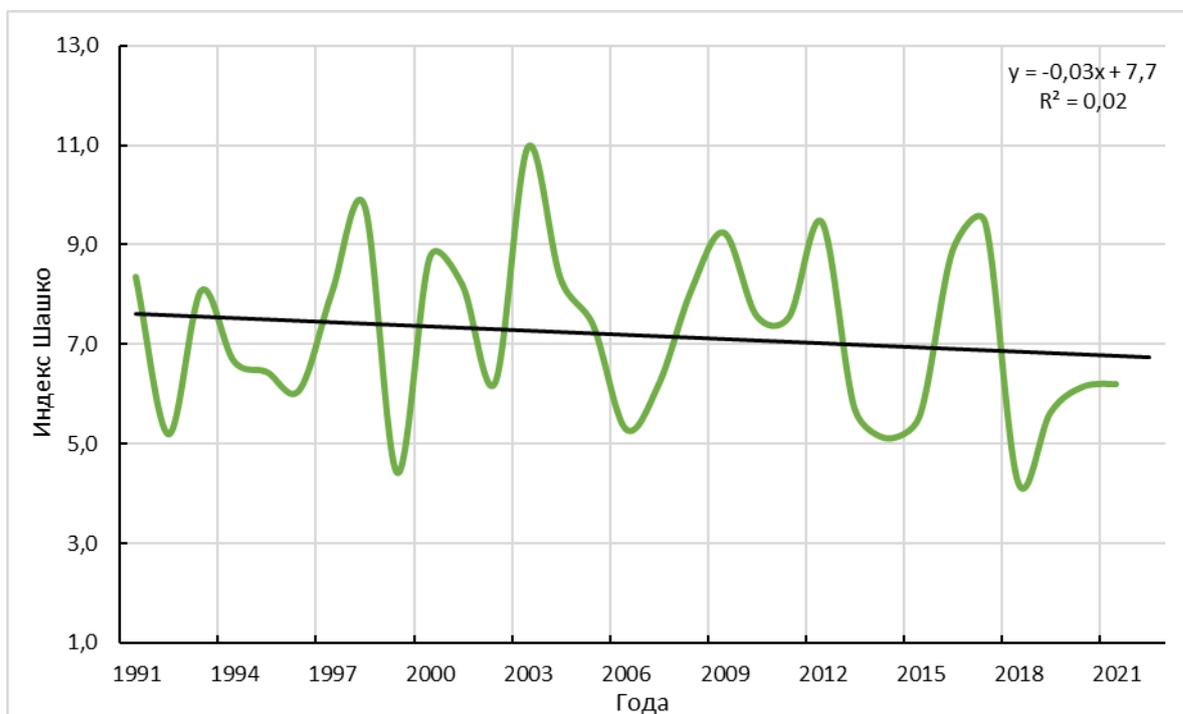


Рисунок 21. Среднегодовой индекс Шашко за 1991-2021 гг.

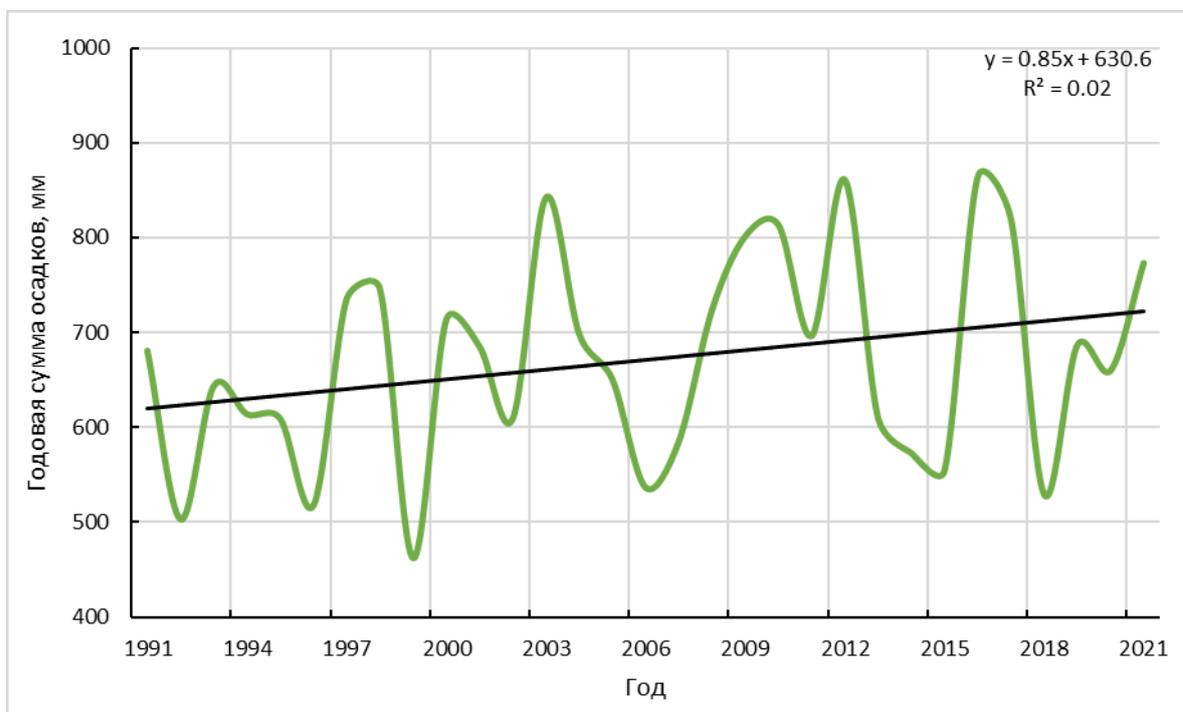


Рисунок 22. Среднегодовое количество осадков за 1991-2021 гг.

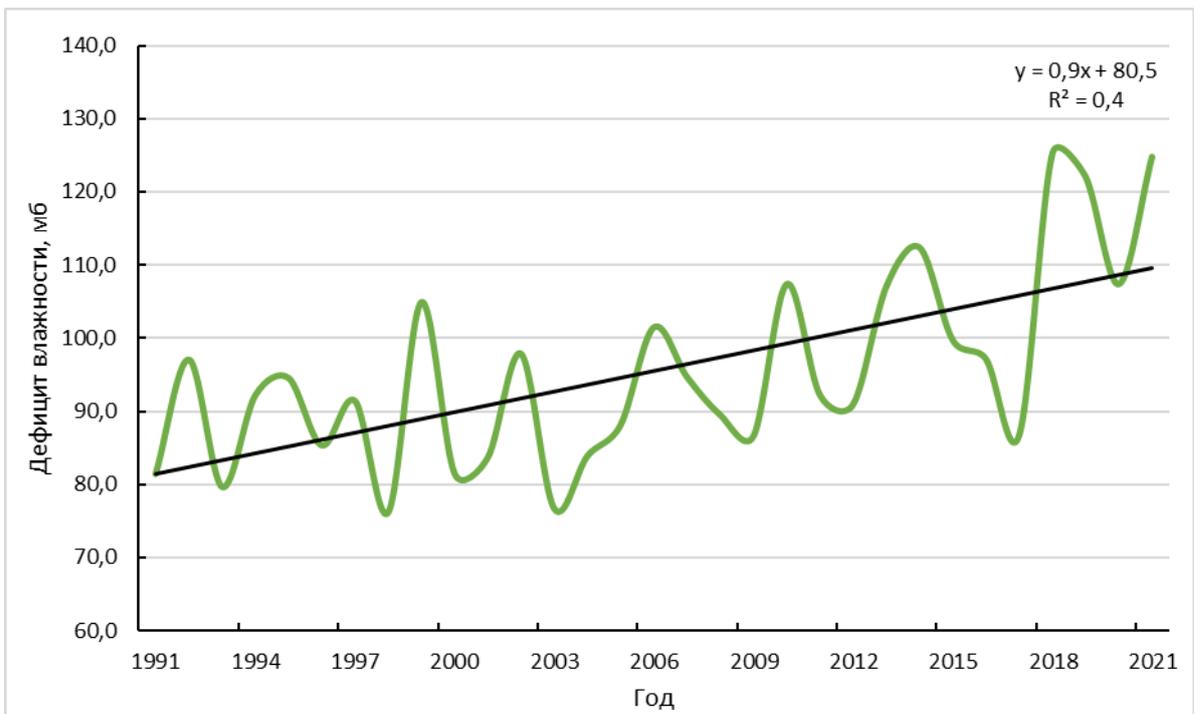


Рисунок 23. Среднегодовая сумма дефицитов влажности за 1991–2021 гг.

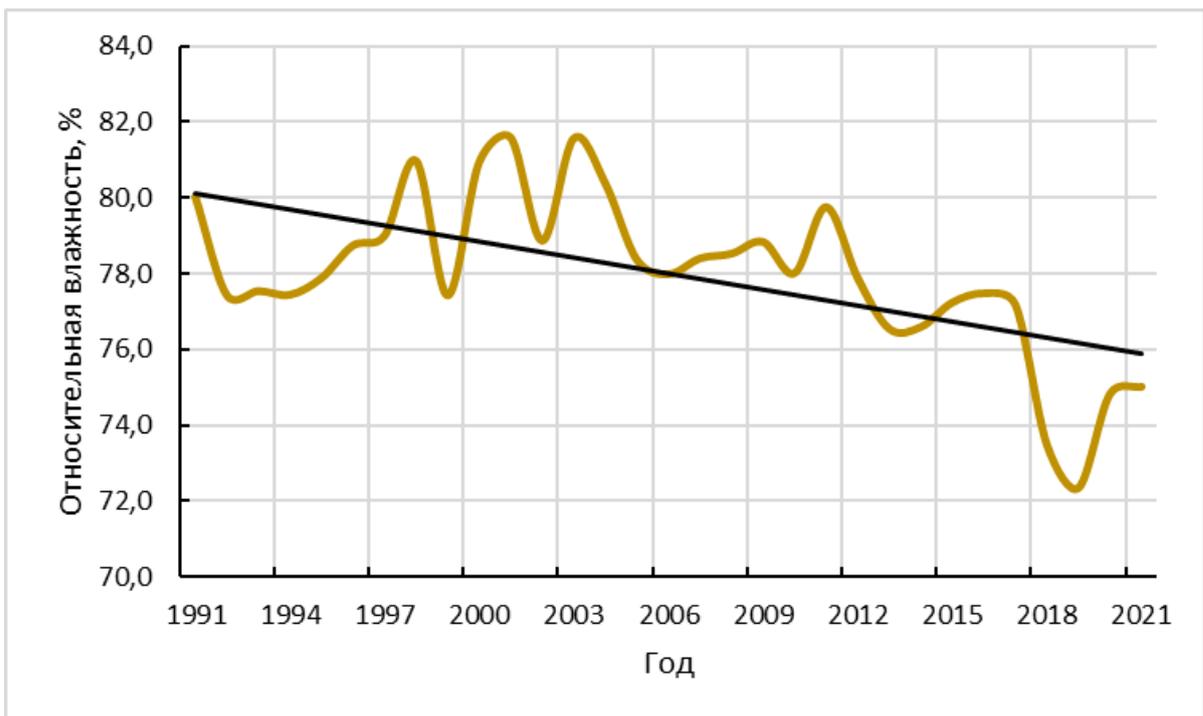


Рисунок 24. Среднегодовая относительная влажность за 1991–2021 гг.

Комплексно оценив климатическую ситуацию в Санкт-Петербурге, определив среднюю длину безморозного периода и его температуру, показатели влажности, обратимся к результатам расчетов выбросов вредных веществ. Для расчета было определено два сценария. Первый сценарий заключается в том, что ситуация по утилизации отходов останется неизменной, то есть 20% будет поддаваться обработке и обезвреживанию, остальные – будут захораниваться на полигонах. Второй сценарий же предполагает собой,

что отходы будут утилизироваться в соответствии с целевыми показателями нацпроекта «Экология». Выбросы посчитаны за период с 2020–2030 год. В таблице представлены доли утилизированных и захораниваемых отходов в соответствии с планом проекта «Экология». Далее были получены количественные показатели для двух сценариев (см. таблицу 13).

Таблица 12. Прогностические данные в соответствии с целевыми показателями проекта «Экология»

год	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Кол-о ТКО, тыс. тонн	2367	2407	2438	2500	2500	2531	2531	2591	2620	2648	2675
Доля захоронения, %	85	70	70	62	62	55	47	39	31	23	15
Доля утилизации, %	15	30	30	38	38	45	53	61	69	77	85

Таблица 13. Количество образуемых отходов в зависимости от различных сценариев обращения с ними

	Тип обращения	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
№1	Утилизация, тыс. тонн	355	361	366	375	375	379	379	388	393	397	401
	Захоронение, тыс. тонн	2011	2045	2072	2125	2125	2151	2151	2202	2227	2251	2274
№2	Утилизация, тыс. тонн	355	713	723	940	940	1149	1346	1580	1802	2028	2263
	Захоронение, тыс. тонн	2011	1693	1715	1560	1560	1382	1184	1010	817	619	411

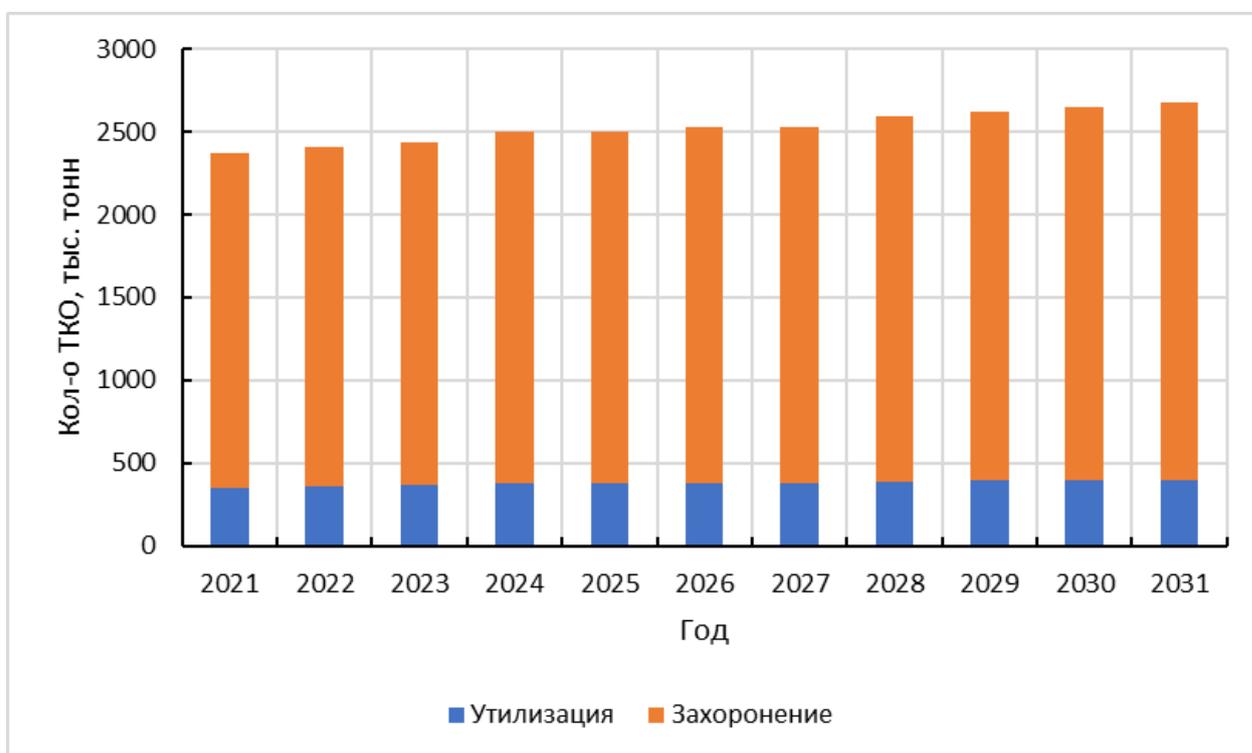


Рисунок 25. Количество образуемых ТКО в год при сценарии №1

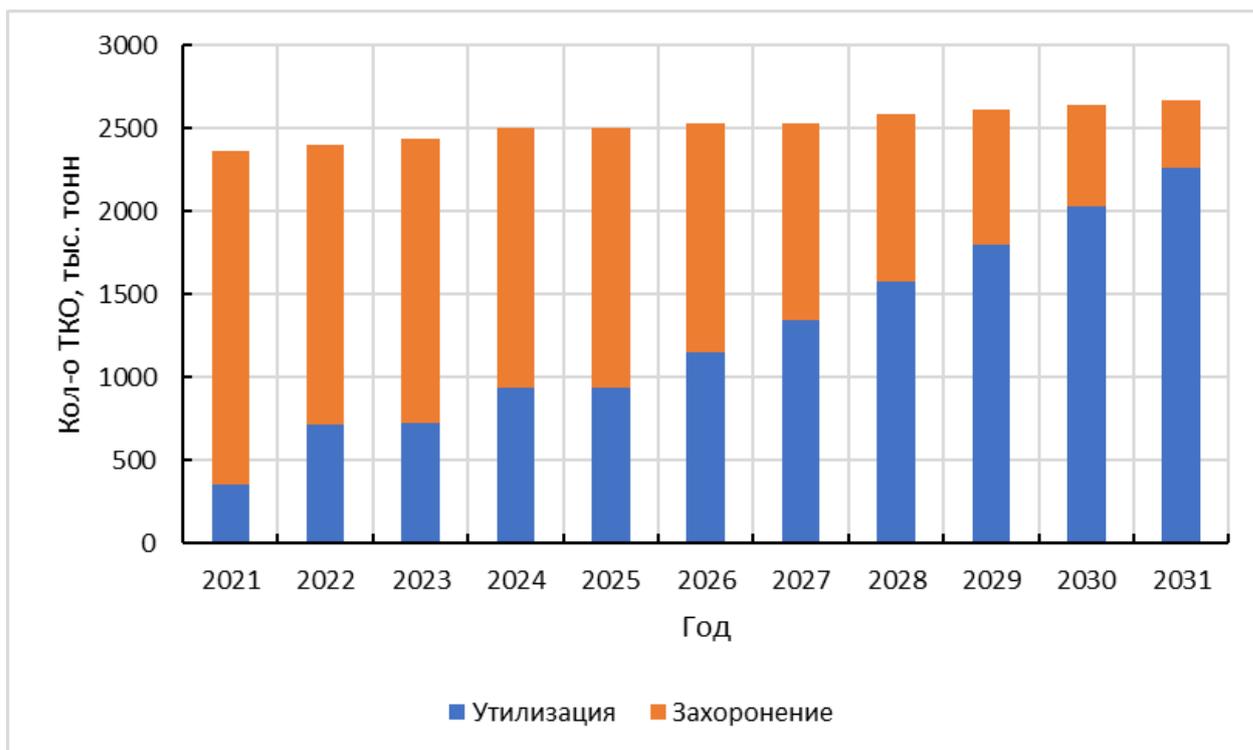


Рисунок 26. Количество образуемых ТКО в год при сценарии №2

Далее был проведен расчет выброса метана по утвержденной отечественной методике. При этом был выбран безморозный период равный 256 дням, а его средняя температура – 11,2°С. Средняя влажность отходов эквивалентна 47%. Суммарный выброс от образовавшихся отходов за 10 лет при первом сценарии составит 67 000 тонн метана, при втором сценарии – 12 140 тонн метана, то есть выброс может сократиться на 54 860 тонн. Стоит понимать, что это не итоговый выброс от полигона ТКО, так как рассмотрен вклад от вновь привезенных отходов на полигон за 10 лет, период разложения которых равен 8 годам, и не учитывается ранее накопленная масса с 20-летним периодом разложения.

Мы видим, что при первом сценарии выбросы метана постепенно увеличиваются, тогда как при втором сценарии выбросы неуклонно сокращаются и к 2031 году при 15% захоронении отходов выбросы могут составить лишь 1517 тонн.

Таблица 14. Прогноз выбрасываемого метана в тыс. тонн в год от полигонов ТКО при различных сценариях обращения с отходами

сценарий	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
№1	7411	7536	7633	7827	7827	7924	7924	8112	8203	8290	8375
№2	7411	6238	6318	5746	5746	5090	4363	3722	3011	2282	1517

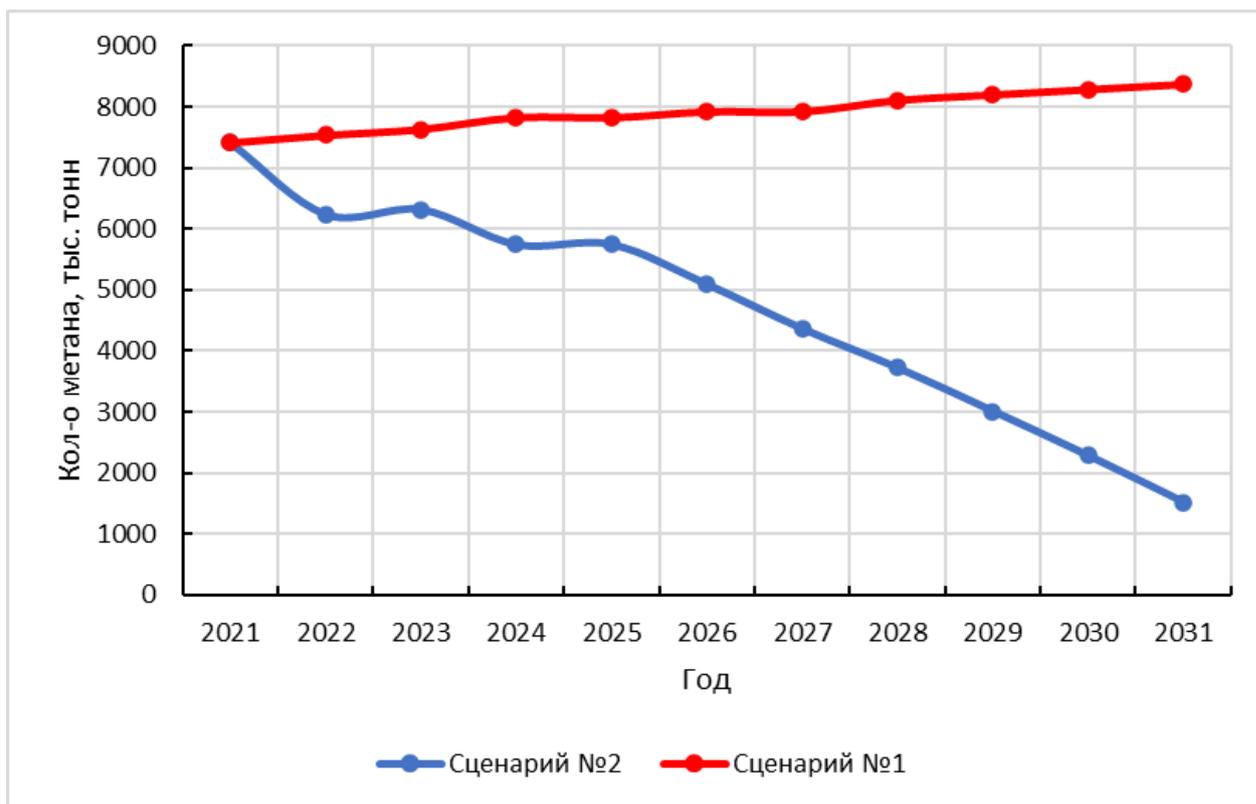


Рисунок 27. Прогноз выбрасываемого метана от полигонов ТКО при различных сценариях обращения с отходами

Поскольку до этого мы рассматривали прогностический валовый выброс в год, то важно также дать оценку существующему положению в Санкт-Петербурге. В среднем ежегодно образуется 2 миллиона тонн отходов, из которых 80% захоранивается, т.е. 1,6 миллионов тонн. Тогда за 20 лет итоговый объем полигонов может составить 32 миллиона тонн. От данного объема ежегодно выбрасывается 111 192 тонн метана.

Следующим шагом при проведении исследования было важно посмотреть влияние климатического изменения на суммарный выброс от полигонов захоронения ТКО. Ранее было показано, что средняя температура безморозного периода не изменилась за последние 30 лет, поэтому в работе не рассмотрен её вклад в суммарный выброс метана от захоронения отходов. В то время как продолжительность этого периода неуклонно растет. По тренду (см. рисунок изменения продолжительности безморозного периода) изменение средней продолжительности безморозного периода увеличивается на 16 дней/10 лет. Таким образом, к 2031 году средняя продолжительность безморозного периода может составить 272 дня. В таком случае, в 2031 году выброс при первом сценарии будет равен 8376 тоннам, что на 1 тонну увеличит выброс относительно того же сценария, но с безморозным периодом в 256 дней. Таким образом, мы можем увидеть, что температурный фактор оказывает влияние на суммарный выброс от полигонов захоронения, но он незначителен.

Немаловажно также рассмотреть влияние влажности воздуха на влажность отходов. Здесь важно оценить сезонность изменения увлажненности и засушливости на территории Санкт-Петербурга, поскольку в летние месяцы климатические условия оптимальны для максимального разового выброса метана в воздух. Исходя из рассчитанного показателя ГТК для летних месяцев, наибольший интерес вызывает август. По тренду мы видим, что значительное увеличение ГТК приходится на август, когда достигается максимум температуры и осадков в межгодовом ходе. За среднюю влажность отходов мы принимаем 47%, максимальный разовый выброс метана при этом равен 436 г/с, если допустить изменение влажности на 3%, то максимальный разовый выброс может составить 469 г/с. С другой стороны, оценка индекса Шашко показала, что средняя увлажненность территории Санкт-Петербурга уменьшается, так как увеличивается испаряемость. Если допустить, что влажность уменьшится на 3%, то суммарный выброс закономерно уменьшится и к 2031 году составит 7900 тонн, что на 475 тонн меньше относительно сценария, когда влажность равна 47%.

Следующим этапом был расчет выбросов по американской методике. При первом сценарии суммарный выброс в 2030 году составит 69 000 тонн, что отличается на 2000 тонны от полученного результата по российской методике. При втором сценарии выброс равен 12 000 тоннам, что соответствует полученному результату при расчете в первой методике. В целом, мы можем сделать вывод о том, что две методики репрезентативны и дают реалистичные результаты.

Принципиальным отличием данной методики от русской является то, что она дает возможность учитывать различие морфологического состава отходов. Таким образом, были посчитаны выбросы метана при различных морфологических составах. Мы можем заметить, что наибольший выброс происходит при учете морф состава из МДП, тогда как наименьший выброс происходит при морф составе единой концепции. Амплитуда составляет 34800 тонн. Такие большие различия связаны с долей биоразлагаемой органики: отходы от еды, бумага, дерево. Как было оценено, в МДП на неё приходится порядком 40%, тогда как в терсхеме и в единой концепции 27% и 22% соответственно. Соответственно увеличение доли биоразлагаемой органики приводит к значительному увеличению выбросов. Это позволяет сделать вывод о том, что извлечение этой части из общей массы отходов значительно позволит решить проблему выбросов от полигонов захоронения.

Таблица 15. Выбросы метана в зависимости от морфологического состава ТКО

Источник морф состава	Терсхема	Единая концепция	МДП
год	тыс. тонн		
2021	46,5	38,2	73,0
2022	47,8	39,3	75,0
2023	49,0	40,3	76,9
2024	50,2	41,2	78,7
2025	51,4	42,2	80,5
2026	52,4	43,1	82,2
2027	53,5	43,9	83,8
2028	54,4	44,7	85,3
2029	55,4	45,5	86,9
2030	56,4	46,3	88,4

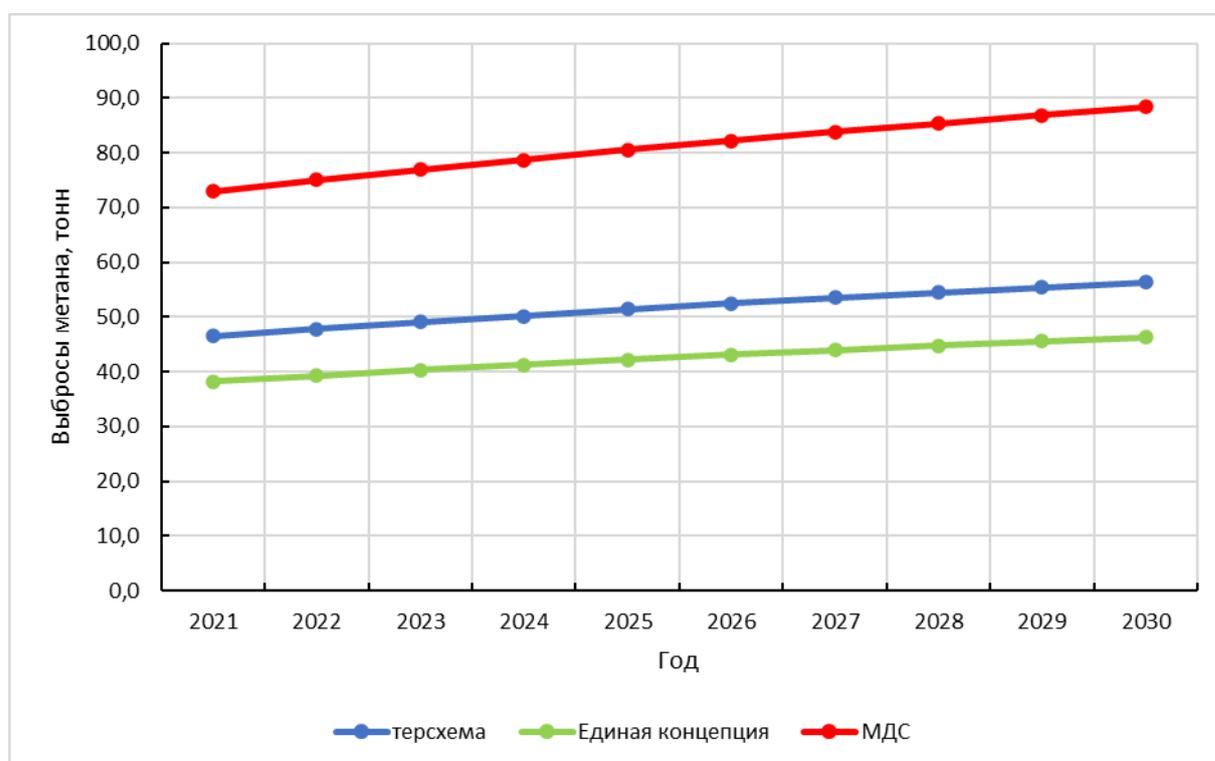


Рисунок 28. Выбросы метана в зависимости от морфологического состава ТКО за период с 2021-2030 год

Из полученных расчетов выбросов была построена карта рассеивания по отдельным компонентам. Наибольший интерес представляет метан. В качестве источников выбросов были взяты – полигон «Новоселки» и мусороперерабатывающий комплекс. Для расчета выбросов вредных веществ и их рассеивания от полигона ТКО была взята масса ввозимых за год отходов, равная 600 тыс. тонн. Для расчета рассеивания от планируемого завода была взята его производительность в 600 тыс. тонн. Было получено две карты рассеивания вредных веществ: мажоранта выбросов от завода (рисунок 29), карта рассеивания метана от полигона ТКО (рисунок 30).

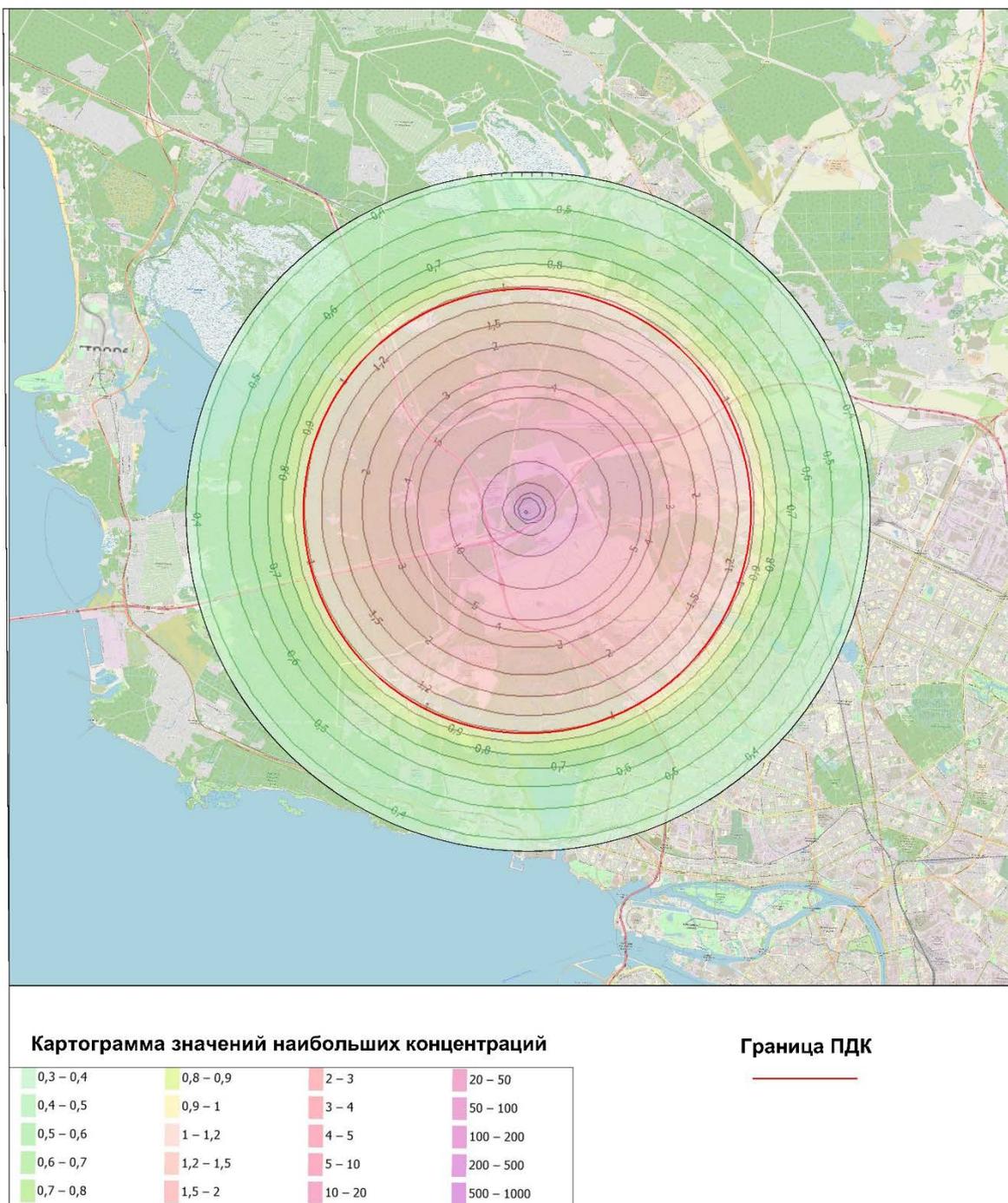


Рисунок 29. Мажоранта рассеивания вредных веществ от завода по переработке отходов

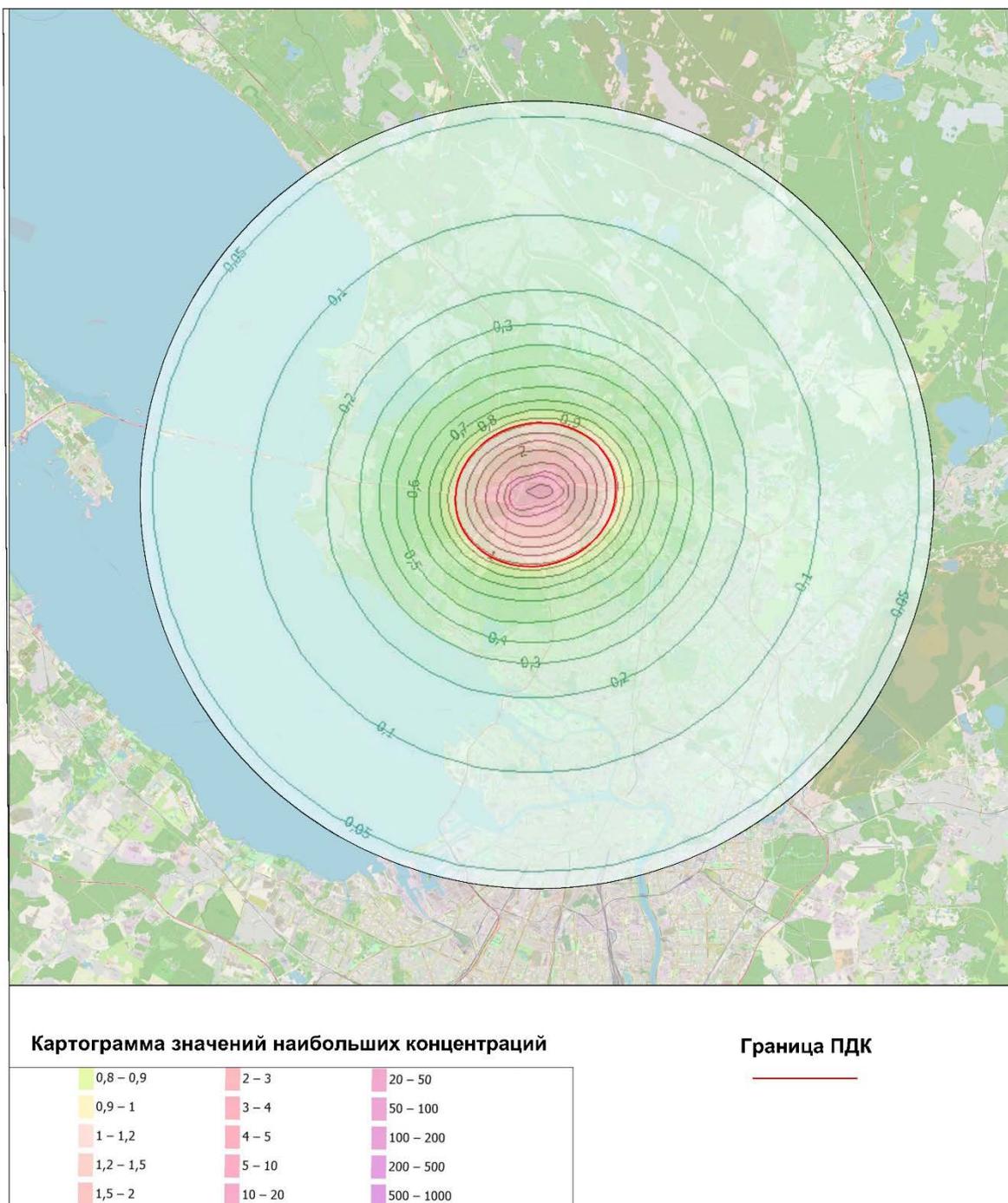


Рисунок 30. Карта рассеивания метана от полигона ТКО

4.3. Выводы

Полученные результаты позволили комплексно оценить сценарии выбросов парниковых газов от системы обращения с ТКО в Санкт-Петербургской агломерации с учетом различных прогнозов увеличения в них доли утилизируемых, обезвреживаемых и обрабатываемых отходов, а также изменения гидрометеорологических условий, определяющих условия образования биогаза при разложении органических компонентов.

По результатам анализа продолжительных рядов климатических параметров в Санкт-Петербурге, было установлено, что наибольшее влияние на выбросы парниковых газов от полигонов ТКО оказывают изменения температуры и влажности приземного воздуха.

В работе было выявлено, что изменение различных климатических параметров имеет разнонаправленное влияние на выбросы парниковых газов от биоразлагаемой части захораниваемых отходов.

Показано, что изменение температуры воздуха в летний период приводит к увеличению выбросов метана. При этом снижение относительной влажности воздуха, напротив замедляет их.

Предварительно можно заключить, что влияние термического фактора не столь значительно, как влияние влажности воздуха на выбросы вредных веществ. Однако для верификации расчетных результатов целесообразно организовать систематические газогеохимические исследования выбросов биогаза на участке захоронения отходов.

Кроме оценки влияния климатических факторов на выброс парниковых газов, рассмотрено воздействие различного морфологического состава на этот процесс – чем больше органики содержат отходы, тем выше их эмиссии. Таким образом, можно сделать вывод о том, что обеспечение раздельного сбора мусора и обезвреживание отходов необходимы для снижения выброса метана в атмосферу, а также являются важной частью для создания экономики замкнутого цикла и осуществления «зеленого перехода» в секторе жилищно-коммунального хозяйства.

Поскольку в настоящее время уделяется активное внимание созданию рынка углеродных единиц, то реализация климатических проектов в секторе отходов является важной и актуальной задачей. В отличие от задач по повышению поглощающей способности лесов и иных экосистем, внедрение климатических проектов в отрасли по обращению с ТКО, является значительно более контролируемой и краткосрочной процедурой.

Список литературы

1. Буквич Р.М., Петрович Д.Р. Парниковый эффект и рыночные механизмы Киотского протокола, 2017;
2. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России»;
3. Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики, октябрь 2020. Экология и экономика: тенденция к декарбонизации, глава «Парниковые газы»;
4. Воронкова Т.В., Чудинов С.Ю. Система управления образованием фильтрата на полигоне ТБО, 2013;
5. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 30.09.2021 N 1029-ст) // СПС КонсультантПлюс;
6. Единая концепция обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области (с возможностью разделения потоков ТКО), 2021;
7. Кадысева А.А., Гильмутдинов Р.М., Тарапатова А.С., Токарев В.В., Безухова С.А., Влияние температуры на анаэробное сбраживание органического субстрата, 2013;
8. КС РКИК ООН, 1997. Киотский протокол к РКИК ООН; Конференция сторон РКИК ООН – Электронные данные – Режим доступа: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf>;
9. Научно-практический журнал «Твердые бытовые отходы», март 2023, с. 28-44;
10. Научно-практический журнал «Твердые бытовые отходы», февраль 2023, с. 16-18;
11. Национальный проект «Экология» (<https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/projects/ekologiya>). Просмотрено: 10.05.2023;
12. Малинин В.Н., Гурьянов Д.А., Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге, изд. РГО, 2015, т. 147, вып. 5;
13. Поляк И.И. – Труды ГГО, 1975;
14. Публичная Кадастровая Карта Росреестра (<https://pkk.rosreestr.ru/>). Просмотрено: 11.05.2023;
15. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата от 09.05.1992;

16. Распоряжение Правительства РФ от т 22.10.2021 №2979-р «Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов // СПС КонсультантПлюс;
17. Распоряжение Комитета по тарифам Санкт Петербурга от 14.04.2017 №30-р // СПС КонсультантПлюс;
18. Региональная информационная система Санкт-Петербурга (<https://www.rgis.spb.ru/>). Просмотрено: 11.05.2023;
19. Руководство МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов 2006 года, Том 5, глава 3;
20. Селянинов Г.Т. 1958. Происхождение и динамика засух. – В кн.: Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай. – Л., Гидрометеиздат, с. 5 – 30;
21. Синицина Н. И., Гольцберг И. А., Струнников Э. А., Агроклиматология, 1973;
22. Территориальная схема обращения с отходами производства и потребления // Распоряжение Комитета по благоустройству Санкт- Петербурга от 13.07.2020 № 193-р с учетом распоряжения Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга от 21.05.2021 № 143-Р;
23. Черемисинов А.Ю., Черемисинов А.А., Красов В.Д., Определение потребности в гидромелиорации на основе оценки атмосферного увлажнения, 2012;
24. Шашко Д. И. Агроклиматическое районирование СССР / Д. И. Шашко. – М.: Колос, 1967. – 335 с.;
25. Шихлинский Э.М. Об основных показателях при классификации климатов / Э. М. Шихлинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – С.24-37;
26. Arrhenius, Svante. On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground, Philosophical Magazine and Journal Science, Series 5, Volume 41, pp. 237–27;
27. Sixth Assessment Report – IPCC (<https://www.ipcc.ch>). Просмотрено: 22.10.2022;
28. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023;
29. Fourier, Joseph. Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires p. 97–125, Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France, t. VII, p.570 à 604. Paris, Didot; 1827;
30. Rose Kahele. Behind the Inconvenient Truth. 'Hana Hou!, vol. 10, No. 5, 2007;
31. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide - Global Monitoring Laboratory (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>). Просмотрено: 25.01.2021;

32. The twenty-fourth session of the Conference of the Parties (COP 24), the fourteenth session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol (CMP 14), and the third part of the first session of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement (CMA 1.3) (<https://unfccc.int/conference/katowice-climate-change-conference-december-2018>).

Просмотрено: 04.04.2023.

Приложения

Таблица 16. Расчетные показатели ГТК за период с 1991-2021 гг.

год	сумма, °С	осадки, мм	ГТК
1991	2247	342,5	1,5
1992	2163,1	191,3	0,9
1993	1876,7	361,6	1,9
1994	1931,4	326,9	1,7
1995	2048,8	208,1	1,0
1996	1746,2	230,9	1,3
1997	1991,1	216,3	1,1
1998	1992,2	436,4	2,2
1999	2120,3	127	0,6
2000	1900,3	366	1,9
2001	1973,6	285,2	1,4
2002	2435,1	272	1,1
2003	2330,5	479,1	2,1
2004	2378	389,9	1,6

2005	2451,4	299,7	1,2
2006	2721,1	262,4	1,0
2007	2423,9	322,8	1,3
2008	2120	278,9	1,3
2009	2296,4	398,4	1,7
2010	2485	363,5	1,5
2011	2556,9	391,1	1,5
2012	2338,5	453,6	1,9
2013	2476,5	305,2	1,2
2014	2444,7	306,5	1,3
2015	2361,4	234,5	1,0
2016	2471,1	495,9	2,0
2017	1999,6	429,9	2,1
2018	2748,5	273,1	1,0
2019	2179	244,6	1,1

2020	2360,3	321,8	1,4
2021	2628,5	332,2	1,3