



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра геоэкологии, природопользования и экологической безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Эмиссия диоксида углерода из почв парка им. Бабушкина

Исполнитель

Шувалова Екатерина Максимовна

Руководитель

кандидат биологических наук, доцент

Рижия Елена Яновна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат биологических наук, доцент

Мухин Иван Андреевич

«16» 08 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение	Ошибка! Закладка не определена.
Глава 1 Роль диоксида углерода в глобальном изменении экосистем .	Ошибка! Закладка не определена.
1.1 Глобальное изменение климата: современное состояние проблемы и международное признание.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.2 Эмиссия парниковых газов	Ошибка! Закладка не определена.
1.3 Мировой опыт изучения парниковых газов	Ошибка! Закладка не определена.
1.4 Опыт изучения парниковых газов в России	Ошибка! Закладка не определена.
1.4.1 Карбоновые полигоны	Ошибка! Закладка не определена.
1.4.2 Микродинамические пульсации...	Ошибка! Закладка не определена.
1.4.3 Метод закрытых камер	Ошибка! Закладка не определена.
Глава 2. Объект и методы исследования...	Ошибка! Закладка не определена.
2.1 Объекты	Ошибка! Закладка не определена.
2.1.1 Физико-географические условия территории	Ошибка! Закладка не определена.
2.1.2 Характеристика участков парка им. Бабушкина и их вклад в эмиссию диоксида углерода.....	Ошибка! Закладка не определена.
2.1.3 Описание климатических показателей	Ошибка! Закладка не определена.
2.1.4 Почвенный покров парка	Ошибка! Закладка не определена.
2.2 Методы.....	Ошибка! Закладка не определена.
Глава 3. Полученные результаты	Ошибка! Закладка не определена.
3.1 Содержание общего углерода	Ошибка! Закладка не определена.
3.2 Биологическая активность	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Углерод микробной биомассы	Ошибка! Закладка не определена.
3.4 Эмиссия CO ₂	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение	Ошибка! Закладка не определена.
Список литературы	Ошибка! Закладка не определена.
Приложение	Ошибка! Закладка не определена.

Введение

Изменение климата является одной из ключевых глобальных проблем современности, и вопросы, связанные с эмиссией парниковых газов в крупных городах, приобретают все большую научную и практическую актуальность. Санкт-Петербург, являясь крупным экономическим, промышленным и культурным центром России, расположен в зоне, подверженной серьезным климатическим рискам, связанным с повышением уровня Балтийского моря, изменением температурных режимов и увеличением частоты экстремальных погодных явлений [17].

Последние десятилетия значительное количество исследований посвящены выбросам парниковых газов, происходящие в результате антропогенной деятельности, в частности - автомобильного транспорта, энергетики, промышленности, коммунального и сельского хозяйства. Данные источники вносят существенный вклад в формирование региональных климатических изменений. Поэтому изучение масштабов, структуры и источников эмиссии представляет собой необходимый этап для разработки эффективных мер по смягчению последствий изменения климата и обеспечению устойчивого развития территории [16].

Другой важнейший источник эмиссии, которому уделяют меньшее внимание — это почвы. С одной стороны они выступают в качестве основного поглотителя и хранилища для активного углерода (C) в наземных экосистемах, но с другой стороны - они выделяют CO₂ через почвенное дыхание, и относятся к числу крупнейших наземных потоков биогенного углерода в атмосферу. Баланс между поглощением и выбросами CO₂ в почве зависит от множества факторов, включая биоклиматические условия, почвенный покров и землепользование. Изменение землепользования считается доминирующим антропогенным фактором запасов и потоков C в почве (МГЭИК, 2013). В том случае, если потоки CO₂ из природных и сельскохозяйственных экосистем

довольно тщательно изучены [12], то эмиссии CO₂ из городских почв недостаточно известны или поняты Города занимают важное место среди источников парниковых газов. На их долю, по разным оценкам, приходится от 30–40 до 75–80% всех антропогенных выбросов в атмосферу, следовательно, необходимы количественные оценки вклада городских почв в эмиссию парниковых газов, для получения данных, требуемых для прогнозирования глобальных изменений и исследований климата [4, 13].

Анализ эмиссии парниковых газов из почв в Санкт-Петербурге позволяет оценить не только современное состояние экологической ситуации, но и выявить ключевые направления на снижение антропогенной нагрузки на климатическую систему. Данные, полученные в ходе выпускной квалификационной работы, имеют важное значение для реализации адаптационных мероприятий, направленных на улучшение экологической обстановки в городе, а также необходимы для формирования городской экологической политики.

По данным Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга за 2025 год в городе содержится около 3669 объектов зеленых насаждений общего пользования городского значения, резерва озеленения и уличного озеленения, в совокупности общей площадью почти 8 тысяч гектар или 5,5% от общей площади города [9]. Данная цифра возросла из-за присоединения к городу бывших пригородов, ныне Петродворцового, Красносельского, Пушкинского, Колпинского и Курортного районов города. Городские парки, сочетающие в себе элементы природной и антропогенной среды, подвержены специфическим воздействиям, влияющим на функционирование почвенных экосистем и эмиссию парниковых газов. Необходимость сохранения и повышения экологической устойчивости городских территорий, а также выполнения международных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов обуславливает важность детального изучения процессов эмиссии парниковых газов из почв в городских парках

Изученность вышеприведенного вопроса, в контексте применения к городским паркам, остается несовершенным несмотря на значительное количество исследований, которые посвящены выбросам парниковых газов из почв в той или иной экосистеме. Для разработки научно обоснованных рекомендаций по управлению почвенными ресурсами и снижению выбросов парниковых газов на городских территориях, прежде всего необходимо оценить вклад почв парков на территории города в общий баланс парниковых газов, помимо этого важно определить факторы, которые контролируют выбросы парниковых газов.

Исследование выбросов парниковых газов в почвах Санкт-Петербурга обладает высокой научной и практической значимостью и направлено на достижение долгосрочных целей по обеспечению экологической безопасности и сохранению благоприятных условий для жизни населения.

Цель работы – провести оценку сезонной динамики эмиссии диоксида углерода из городских почв, расположенных на территории парка им. Бабушкина.

Задачи исследования:

1. Изучить роль диоксида углерода в глобальном изменении экосистем на основании литературных источников.
2. Исследовать биологическую активность различных участков парка методом газовой хроматографии.
3. Оценить эмиссию CO₂ из почвенного покрова парка.
4. Разработать рекомендации по снижению эмиссии CO₂ из почв парка.

Глава 1 Роль диоксида углерода в глобальном изменении экосистем

1. Глобальное изменение климата: современное состояние проблемы и международное признание

В современное время изменение климата является одной из самых остро обсуждаемых экологических явлений с начала прошлого века. С того времени было проведено многочисленное количество научных исследований и наблюдений, анализируя которые, можно увидеть тенденцию к изменению глобального климата Земли. Средняя глобальная температура планеты повысилась более, чем на 1,5 градуса с доиндустриального уровня (примерно 1850–1900 года), однако эта цифра не остановилась и продолжает расти. В 2023 году европейская служба Copernicus сообщила о том, что 17 ноября 2023 года средняя температура поверхности Земли впервые оказалась более чем на 2°C выше доиндустриального уровня, превышение составило 2,06°C [26]. Данное число показывает, насколько быстро нагревается планета благодаря повышению уровня парниковых газов.

Парижское соглашение, подписанное 12 декабря 2015 года, поставило цель ограничить повышение средней глобальной температуры «значительно ниже 2°C по сравнению с доиндустриальным уровнем» и приложить усилия для ограничения повышения температуры до 1,5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем [14]. В нём не было чёткого определения того, что подразумевается под повышением температуры на 1,5°C или 2°C по сравнению с доиндустриальным уровнем, но учёные-климатологи обычно считают, что это происходит, когда среднесуточная температура в долгосрочной перспективе повышается более чем на 1,5°C или 2°C по сравнению с концом XIX века. Из-за особенностей средних показателей будет неясно, когда мир достигнет этих пределов, в течение нескольких лет после этого.

Важно отметить, что изменение климата некорректно называть «глобальным потеплением» в силу того, что глобальное потепление связано только с увеличением среднего температурного уровня планеты, в то время как глобальное изменение климата демонстрирует, как именно меняется климат планеты, отдельно рассматривая учащение периодов аномальной жары, таяние ледников, частоту аномальных бедствий, таких как ураганы, засухи и наводнения, а также изменения в структуре осадков и уровне моря, которые могут оказывать большее воздействие на человека, чем только более высокие температуры. Таким образом, глобальное потепление фокусируется на повышении температуры, а глобальное изменение климата охватывает более широкий спектр климатических изменений.

1.2 Эмиссия парниковых газов

Парниковые газы, преимущественно диоксид углерода, ограничивают отвод длинноволнового излучения, отраженного поверхностью Земли, создавая эффект, аналогичный стеклянной крыше теплицы. Атмосфера, обогащенная такими газами, обеспечивает проникновение солнечного теплового излучения к поверхности планеты, но препятствует выходу отраженного тепла в космическое пространство, данный фактор парникового эффекта приводит к повышению температуры приповерхностного слоя воздуха и самой поверхности Земли [7].

Одним из ключевых факторов изменения климата является усиление парникового эффекта. В первой четверти XIX века французский ученый Жозеф Фурье, опираясь на математические расчеты, пришел к выводу, что солнечного излучения недостаточно для поддержания наблюдаемой температуры на поверхности Земли – без дополнительного источника тепла средняя температура планеты была бы значительно холоднее. Идеи Фурье были развиты его соотечественником, Клодом Пуье, предложившим теоретическую модель парникового эффекта, опираясь на которую инфракрасное излучение,

которое испускает Земля, частично поглощается водяным паром и углекислым газом.

В дальнейшем важный вклад в понимание механизмов парникового эффекта внесли американская ученая и изобретательница Юнис Фут и британский физик Джон Тиндаль. Независимо друг от друга, опытным путем, на основе многочисленных наблюдений и экспериментов, доказали способность различных газов испускать инфракрасное излучение. Позже, 1896 году, химик Сванте Аррениус, родом из Швеции, осуществил первые количественные оценки возможного повышения глобальной температуры в случае удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере. После вышеперечисленных вкладов в изучение парникового эффекта шведский метеоролог Нильс Экхольм в начале XX века, ввел термин «парникового эффекта», назвав его также «теплицей» для описания действия углекислого газа.

Суть данного явления заключается в способности некоторых атмосферных газов (в первую очередь водяного пара, который является самым мощным парниковым газом в силу того, что поглощает наибольшее количество инфракрасной энергии) поглощать длинноволновое тепловое излучение Земли, в результате чего атмосфера нагревается и, в свою очередь, излучает тепло обратно к поверхности, тем самым усиливая ее прогрев. Благодаря данному механизму выяснилось, что при отсутствии парникового эффекта на планете, средняя температура Земли была бы приближена к -18°C , что составляет разницу в 33°C ниже по сравнению с современной температурой планеты. Влияние антропогенных факторов приводит к дополнительному усилению парникового эффекта, нарушая тепловой баланс Земли. Вышеуказанный дисбаланс вызывает прогрессирующее потепление, составляя при этом менее 1Вт/м^2 , что эквивалентно менее 1% общего теплового баланса. Важным фактором здесь играет аккумуляция 90% тепла Мировым океаном, тогда как лишь около 1% идет на нагревание атмосферы [24].

В начале XX века появились первые научные свидетельства о том, что деятельность человека оказывает влияние на климатическую систему Земли. Значительный вклад в популяризацию и развитие данной темы внес советский климатолог Михаил Иванович Будыко. В своей работе «Влияние человека на климат», написанной в 1972 году, он указывал что рост концентрации углекислого газа может привести к повышению температуры, превышающему амплитуду естественных климатических колебаний, зафиксированных в первой половине XX века [2]. Учёный также прогнозировал, что в XXI веке дальнейшее накопление CO₂ может вызвать ещё более масштабные изменения климата.

В это же время, на рубеже 1960–1970-х годов, стало активно развиваться направление палеогеографии и её подраздел — палеоклиматология. Благодаря анализу ледяных кернов из Антарктиды было установлено, что концентрация углекислого газа во второй половине XX века достигла значений, не наблюдавшихся за последние 150 тысяч лет. Эти данные стали важным инструментом в отделении естественных климатических процессов от тех, что обусловлены деятельностью человека. Одной из задач палеоклиматологии также является поиск климатических аналогов современного потепления в прошлом, что позволяет делать обоснованные прогнозы о будущем климате Земли.

Диоксид углерода (CO₂) играет одну из ключевых ролей в глобальном изменении климата, являясь самым главным парниковым газом, который содержится в наибольшей концентрации по сравнению с остальными парниковыми газами. Его концентрация регулируется балансом процессов фотосинтеза, дыхания организмов, горения органических веществ и геохимических процессов в природе. Имея способность эффективно поглощать и переизлучать инфракрасное излучение, углекислый газ способствует удержанию тепла в атмосфере, данная способность приводит к повышению средней температуры поверхности Земли, что и является главной функцией парникового эффекта. Увеличение концентрации CO₂ в атмосфере, начиная с индустриальной революции, связано, прежде всего, с

антропогенным воздействием, источниками которых могут послужить сжигание ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ) и уменьшение количества лесных массивов человеком. Рост концентрации диоксида углерода с доиндустриального уровня приводит к дополнительному радиационному воздействию, что вызывает глобальное потепление и связанные с ним климатические изменения [19].

Наиболее важные и значимые запасы углерода представляются в виде диоксида углерода, которые, так или иначе распространены в атмосфере. Именно поэтому, стоит изучить все те составляющие углекислого газа, которые содержатся в атмосфере. Биологический круговорот углерода начинается, когда фотосинтезирующие организмы усваивают углекислый газ или карбонаты из окружающей среды. В наземных сообществах растения преобразуют атмосферный углекислый газ в соединения на основе углерода посредством фотосинтеза. Во время этого процесса растения расщепляют углерод от двух молекул кислорода и выделяют кислород обратно в окружающую среду. Таким образом, растения в первую очередь отвечают за наличие атмосферного кислорода. В водных сообществах растения используют растворенный углерод в форме карбонатов или углекислого газа в качестве источника углерода для фотосинтеза. После того, как углерод был усвоен фотосинтезирующими организмами, а также животными, которые их едят, он снова выделяется в форме углекислого газа, когда эти организмы дышат. Выделение углекислого газа в атмосферу или гидросферу завершает биологическую часть углеродного цикла (рисунок 1).

На сегодняшний день, ко всем перечисленным факторам прибавились еще и все те выбросы, которые непосредственно образуются при процессе сжигания топлива ископаемого класса. В последнее время ощутимым камнем преткновения является то, что правительства различных стран уже несколько лет пытаются прийти к международному соглашению в области выбросов углекислого газа. Углекислый газ является одним из наиболее значимых парниковых газов как по количеству в атмосфере, так и по вкладу в усиление парникового эффекта. Его концентрация регулируется балансом процессов

фотосинтеза, дыхания организмов, горения органических веществ геохимических процессов в природе. Несмотря на естественные колебания содержания CO_2 , в последние десятилетия наблюдается его устойчивый рост, обусловленный антропогенными факторами.



Рисунок 1 – Круговорот углерода в природе (рисунок с сайта Science debate)

В почве: Почвы играют важную роль в глобальном углеродном цикле, являясь как крупным резервуаром, так и источником углекислого газа. Накопление углерода в почвах происходит за счёт внесения органических остатков растений, продукции корневых систем и микроорганизмов. Эти органические вещества подвергаются разложению под действием почвенной биоты, в результате чего высвобождается CO_2 .

Эмиссия диоксида углерода из почвы осуществляется в процессе дыхания почвенных организмов, что также носит второе название - почвенное дыхание, разложения мёртвой органики (гетеротрофное дыхание) и дыхания живых корней растений (аутотрофное дыхание). Интенсивность этих процессов определяется различными факторами, такими как температура,

содержание органического вещества, влажность почвы, и наконец физико-химические свойства почвы.

Факторы, влияющие на уровень эмиссии углекислого газа из почвы:

- Температура почвы: благодаря повышению температуры в почвенном слое увеличивается активность микробов, которые в свою очередь способствуют более быстрому разложению органического вещества, тем самым увеличивая концентрацию выбросов углекислого газа [20];
- Почвенная влажность: активному разложению органики способствует наилучшая влажность почвы, однако переувлажнение может ограничивать доступ кислорода и замедлять процессы минерализации;
- Содержание органического вещества: почвы, богатые органикой, обладают большим потенциалом для эмиссии диоксида углерода в процессе разложения;
- Структура, аэрация и тип почвы, влияющие на движение газов и насыщение кислородом: к примеру, глинистые почвы, как правило, медленнее отдают углерод по сравнению с песчаными, данная особенность связана, прежде всего, с различным уровнем насыщения почвы кислородом и водоудерживающей способностью;
- Тип растительности и её активность, определяющие поступление свежей органики и интенсивность корневого дыхания: наличие и тип растительности влияют на поступление органического вещества в почву, и, соответственно, на процессы эмиссии;
- Климатические условия: количество осадков, сезонность и экстремальные погодные явления напрямую влияют на динамику эмиссии CO₂;
- pH почвы: кислотность почвы влияет на состав микробных сообществ и интенсивность разложения органики [18].

Антропогенное воздействие является основным фактором выбросов диоксида углерода в современном и будущем изменении климата. Научный журнал Президиума Российской академии наук под названием «Доклады Академии наук» опубликовал аналитический обзор вклада антропогенных и

естественных эмиссий CO₂ и CH₄ в глобальные изменения климата, с использованием сценариев RCP (Representative Concentration Pathways-репрезентативные (представленные) пути концентрации), что является международным стандартом оценки климатических изменений. На основании документа были проанализированы сценарии RCP, описывающие возможные траектории изменения концентрации парниковых газов, включая наиболее встречаемые, такие как диоксид углерода и метан, а также радиационного воздействия к 2100 году. Основными сценариями выступают RCP2.6, соответствующий низкому уровню выбросов и ограничивающий потепление до 1,5-2°C, RCP4.5 и RCP6.0 представляют собой средние сценарии с умеренным ростом выбросов, а также RCP8.5, который относит к себе высокие уровни выбросов, способствующие сильному потеплению [25].

Вкладом антропогенных и естественных выбросов в глобальном изменении климата по RCP служат следующие сценарии. RCP2.6 показывает, что антропогенной эмиссией вышеупомянутых парниковых газов может послужить значительное снижение антропогенных эмиссий и активное сокращение выбросов, при этом естественные эмиссии парниковых газов, не имеющих связи с антропогенным воздействием, остаются стабильными или снижаются. В результате потепление будет ограничено, а климатические риски минимизированы. Сценарий RCP4.5/RCP6.0 показывает, что антропогенные эмиссии имеют умеренный рост и частичное сокращение эмиссий при возможных увеличениях естественных эмиссий, связанных с таянием вечной мерзлоты. В результате итоговое влияние на климат имеет умеренное потепление с ростом экологических рисков. Рассматривая сценарий RCP8.5, антропогенное воздействие имеет резкий рост диоксида углерода и метана при усилении естественных эмиссий, что в итоге приведет к сильному потеплению и экстремальным климатическим последствиям. Более того, в зонах обширного лесного массива и вечной мерзлоты естественные выбросы CO₂ и CH₄ могут увеличиться при потеплении, тем самым усугубив глобальное изменение климата.

Таким образом, сценарии RCP показывают, что только при значительном сокращении антропогенных выбросов (например, RCP2.6) можно ограничить глобальное изменение климата и минимизировать риски, связанные с усилением естественных выбросов. Естественные выбросы, значительные в нормальных условиях сбалансированы естественным поглощением, однако могут усиливаться в силу климатических изменений. Для таких стран, как Россия и Канада важно учитывать влияние как антропогенных, так и естественных источников, особенно в контексте таяния вечной мерзлоты и изменения лесных экосистем.

Важным фактором является повышение качества жизни людей в контексте урбанизации городов, которое разнится с выбросами диоксида углерода. Исследование 2024 года, основанное на глобальном наборе данных с использованием дистанционного зондирования, и ГИС, показало, что города играют ключевую роль в антропогенных выбросах CO₂, обеспечивая около 32,7% глобальных выбросов в 2020 году, составляя около 2,95 гигатонн углерода. С 2000 по 2020 год выбросы углекислого газа в городах выросли в 1,42 раза, при этом темпы роста выбросов опережали рост населения в городах [23]. Это означает, что урбанизация сопровождается линейным ростом выбросов CO₂ – мегаполисы и агломерации производят больше выбросов, чем можно было ожидать, исходя из их численности. Физическая активность городов и площадь урбанизированной территории оказывает значительное влияние на интенсивность выбросов: расширение городской территории часто приводит к увеличению выбросов из-за роста транспортных и энергетических потребностей.

Исследование 2020 года, посвященное анализу выбросов во время принудительной самоизоляции, показало, что во время локдаунов наблюдалось временное снижение ежедневных выбросов CO₂ примерно на 17% в глобальном масштабе. Снижение было связано с резким сокращением транспортных перевозок, промышленного производства и энергопотребления в городах. Однако к лету 2020 года выбросы начали восстанавливаться, демонстрируя, что без системных изменений снижение выбросов носит

кратковременный характер. Общее сокращение выбросов за весь 2020 год составило около 7% по сравнению с предыдущими годами, что значительно меньше, чем рост выбросов, связанный с урбанизацией за последние два десятилетия [28].

Сравнивая показатели урбанизации в период с 2000 по 2020 года и изоляцию от COVID-19 в 2020 году, можно сделать сравнительный анализ, в результате которого рост выбросов CO₂ в результате урбанизации будет иметь прирост, равный 42% за 20 лет, масштаб выбросов в городе составляет порядка 1/3 от глобальных выбросов, имея постоянный рост концентрации диоксида углерода на планете, а основными причинами роста выступают такие показатели как: рост населения, расширение территории городов, использование и развитие транспорта и промышленности. В то время как во время пика самоизоляции концентрация выбросов углекислого газа была снижена на 17%, масштаб выбросов в городах был временно снижен, причинами послужили ограничения передвижения и остановка производства на предприятиях.

Таким образом, урбанизация без внедрения устойчивых технологий и планирования приводит к значительному увеличению выбросов CO₂, что ставит под сомнение экономическую и экологическую эффективность традиционного городского роста. Временное снижение выбросов во время пандемии показало, что существенное сокращение выбросов возможно, но требует системных изменений в экономике, транспорте и энергетике в долгосрочной перспективе. Данный анализ показывает, что урбанизация без устойчивого планирования и технологий приводит к значительному росту выбросов CO₂, который многократно превышает временные сокращения, достигнутые во время пандемии COVID-19. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к развитию городов в интересах климата и устойчивого будущего.

Рассмотренные исторические и научные аспекты формирования представлений о парниковом эффекте позволяют сделать вывод о его ключевой роли в обеспечении теплового баланса Земли и поддержании климатической

стабильности. Эмпирические и теоретические исследования, начатые в XIX веке и активно развивавшиеся в последующем, обосновали физическую природу парникового эффекта и позволили количественно оценить его вклад в формирование климатических условий на планете.

Антропогенное усиление данного эффекта, обусловленное ростом концентрации парниковых газов, прежде всего углекислого газа, привело к возникновению теплового дисбаланса, последствия которого становятся всё более ощутимыми. Современные данные палеоклиматологии подтверждают беспрецедентность текущих темпов изменения климата по сравнению с природными колебаниями за последние десятки тысяч лет, что подчёркивает необходимость учёта антропогенного фактора в климатических моделях и прогнозах. Таким образом, изучение истории и механизма парникового эффекта служит важной основой для понимания современных климатических изменений и выработки стратегий адаптации и смягчения их последствий.

1.3 Мировой опыт изучения парниковых газов

Мировой опыт изучения парниковых газов характеризуется комплексным международным сотрудничеством, разнообразием научных подходов и активным внедрением мер по регулированию выбросов. Ключевыми элементами этого опыта являются мониторинг, оценка, разработка политики внедрение рыночных механизмов.

Международные организации, такие как Всемирная метеорологическая организация (ВМО) и Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC), играют центральную роль в координации научных исследований и мониторинга парниковых газов. ВМО, к примеру, создала Глобальную службу наблюдения за парниковыми газами, которая объединяет данные наземных и космических систем наблюдения, обеспечивая комплексный мониторинг и обмен информацией на международном уровне [31].

Для реализации Парижского соглашения необходим устойчивый мониторинг потоков и концентраций парниковых газов (ПГ) почти в реальном времени. Соглашение акцентирует внимание на антропогенных выбросах, оцениваемых методом «снизу-вверх» на основе статистики. Однако в развивающихся странах такие данные часто отсутствуют, а естественные источники ПГ не учитываются, что снижает точность оценок.

В ответ на эти вызовы Всемирная метеорологическая организация (ВМО) в 2022 году инициировала разработку системы мониторинга ПГ по подходу «сверху-вниз», основанному на атмосферных наблюдениях, моделировании и ассимиляции данных. Эта система опирается на опыт программ GAW, IG3IS и WWW.

Новая Глобальная система наблюдения за парниковыми газами (G3W) будет предоставлять данные о глобальных потоках ПГ и включать:

- интеграцию наземных, авиационных и спутниковых наблюдений;
- стандартизацию данных и методик моделирования;
- координацию спутниковых миссий;
- обучение персонала и развитие инфраструктуры.

Также планируется усиление научных исследований и развитие более доступных методов измерения для повышения эффективности системы [31].

По данным, опубликованным в 2023 году о достижениях службой Глобального мониторинга парниковых газов:

1. Создание и поддержка глобальной сети наблюдений ГСНПГ координирует высококачественные наблюдения за составом атмосферы в глобальном масштабе, что позволяет улучшить понимание взаимодействий между атмосферой, океанами и биосферой. Около 100 стран участвуют в программе ГСНПГ;

2. Обеспечение научной поддержки для международных климатических инициатив ГСНПГ предоставляет научную информацию для политиков, поддерживает международные конвенции и способствует

улучшению понимания изменения климата и трансграничного загрязнения воздуха [30]

3. Разработка новой глобальной инфраструктуры мониторинга В 2023 году Исполнительный совет ВМО одобрил планы по созданию новой Глобальной инфраструктуры мониторинга парниковых газов для заполнения критических пробелов в информации и поддержки действий по сокращению выбросов. Эта инфраструктура направлена на координацию международных усилий по использованию космических и наземных систем наблюдения, а также возможностей моделирования и ассимиляции данных [8]

4. Регулярное информирование и публикация данных ВМО регулярно публикует бюллетени о состоянии парниковых газов в атмосфере. Эти бюллетени информируют о рекордных уровнях концентрации парниковых газов и тенденциях их изменениях [29]

Европейская инициатива по климатическим изменениям (ESA Climate Change Initiative, CCI+), направлена на разработку и валидацию спутниковых данных по концентрациям парниковых газов, в частности диоксида углерода (CO_2) и метана (CH_4), в атмосфере. Основная цель проекта — создание однородных, долгосрочных, научно обоснованных наборов данных, необходимых для поддержки климатических исследований и оценки динамики источников и поглотителей парниковых газов.

Проект использует данные с различных спутниковых миссий, обработка информации осуществляется с применением алгоритмов, разработанных ведущими европейскими научными учреждениями. Результирующие продукты проходят строгую валидацию и становятся доступными научному сообществу через платформу ESA CCI.

Данные, предоставляемые ESA CCI+, широко применяются в моделировании климатических процессов, проверке инвентаризаций выбросов и оценке эффективности мер по снижению эмиссий парниковых газов [27].

1.4 Опыт изучения парниковых газов в России

Российская Федерация является стороной Рамочной конвенции (Федеральный закон «О ратификации рамочной Конвенции ООН об изменении климата»), Киотского протокола (Федеральный закон О ратификации Киотского протокола к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата») и Парижского соглашения (постановление Правительства Российской Федерации от 21 сентября 2019 г. № 1228 «О принятии Парижского соглашения»).

Для реализации международных климатических соглашений на наднациональном, национальном и субнациональном уровнях используются различные меры политики, стимулирующие в числе прочего технологический переход мировой энергетики от генерации на основе углеводородного сырья и других видов топлива к безуглеродным энергоресурсам и энергоресурсам с низким уровнем выбросов парниковых газов.

Кроме того, в стране утверждена Климатическая доктрина РФ, (от 17 декабря 2009 года), которая гласит: «Особую обеспокоенность вызывает беспрецедентно высокая скорость глобального потепления, происходящего в течение последних десятилетий. Современная наука находит все больше подтверждений тому, что хозяйственная деятельность человека, связанная, прежде всего, с выбросами парниковых газов, все сильнее влияет на климат на фоне его естественной изменчивости». Таким образом государство признает сам факт изменения климата и то, что оно происходит в результате деятельности человека.

В данных условиях приоритетное значение приобретает мониторинг и совершенствование количественных оценок потоков парниковых газов, поскольку эти данные позволяют оценивать достижение глобальных целей, принятых международным сообществом. Кроме того, систематические наблюдения за концентрацией парниковых газов в атмосфере представляют собой ключевую экологическую задачу, имеющую значение для различных

дисциплин, включая гидрометеорологию, климатологию, а также оперативное и долгосрочное прогнозирование погодных и климатических изменений [1].

Мониторинг потоков парниковых газов между атмосферой и поверхностью планеты осуществляется на основе расчетных методов (в том числе методов математического моделирования), а также экспериментальных методов мониторинга. Расчетный мониторинг антропогенных потоков парниковых газов выполняется на постоянной основе в Росгидромете [11].

1.4.1 Карбоновые полигоны

В области экспериментального мониторинга потоков парниковых газов в России имеются площадки, где ведутся различные наблюдения за ПГ, но их количество, в сравнении с ведущими зарубежными странами несопоставимо мало. Для верификации данных расчетного мониторинга и получения достоверной оценки эмиссии и поглощения парниковых газов наземными и морскими природными экосистемами на территории России развивается пилотная сеть полигонов мониторинга потоков парниковых газов карбоновые полигоны. Карбоновые полигоны представляют собой территории с уникальными экосистемами, характеризующиеся типичным для данной местности рельефом, структурой растительного и почвенного покрова. Они создаются с целью осуществления мероприятий по контролю климатически активных газов и вовлечения в этот процесс университетов и научных учреждений [6].

1.4.2 Микродинамические пульсации

Интегральный поток диоксида углерода оценивается методом микродинамических (турбулентных) пульсаций (eddy covariance), который сейчас получил широкое мировое признание. В настоящее время метод широко применяется в промышленности, сельском хозяйстве и экологии. В глобальной экологии он стал основным для количественного определения потоков малых

газовых составляющих и аэрозолей атмосферы, как в антропогенно-измененных, так и природных экосистемах, включая озера и моря.

В настоящее время метод турбулентных пульсаций считается одним из наиболее точных и теоретически обоснованных подходов для измерения газовых потоков и мониторинга эмиссий на территориях, варьирующихся по площади от сотен до миллионов квадратных метров. Данный метод основан на сборе высокочастотных данных о перемещении исследуемого газа воздушными потоками в реальном времени непосредственно на месте измерений (*in situ*). На основе этих данных рассчитываются турбулентные потоки в приземном слое атмосферы. Современные измерительные приборы и технологии обработки данных обеспечивают доступность метода и его применимость не только в метеорологических исследованиях, но и в таких дисциплинах, как экология, гидрология, мониторинг окружающей среды и контроль промышленных выбросов.

Основные сложности, с которыми сталкиваются при использовании метода, связаны с необходимостью правильной комплектации измерительных систем, обеспечения их непрерывной работы и обработки значительных объемов данных.

1.4.3 Метод закрытых камер

Традиционно дыхание почвы рассматривалось как индикатор биологической активности почвенного слоя. Для характеристики различных типов почв или их географических вариаций обычно было достаточно значений дыхания, определенных для вегетационного периода в целом или его отдельных этапов. Системы для камерных наблюдений включают набор стационарных камер (прозрачных или непрозрачных) произвольного объема, соединенных через коммутационное устройство с газоанализатором, который может быть как мобильным, так и стационарным.

Принцип функционирования камер закрытого типа заключается в измерении скорости газового потока у поверхности почвы на основе

изменения концентрации целевого газа внутри камеры, температуры воздуха в ней, а также объема камеры и площади ее основания.

Пространственная изменчивость потоков парниковых газов (ПГ) требует применения мультикамерного подхода с размещением измерительных модулей в репрезентативных участках экосистемы, отражающих её структурно-функциональное разнообразие. Временная стратегия предполагает непрерывный мониторинг в течение вегетационного периода с частотой не менее одного замера в час для каждого газового компонента. Это позволяет фиксировать динамику процессов, связанных с температурой, влажностью и активностью почвенной биоты, минимизируя погрешности при оценке суточных и сезонных трендов.

Для повышения точности данных рекомендуется комбинировать автоматизированные системы, обеспечивающие высокое временное разрешение, с ручными камерами. Такая интеграция методов позволяет учесть локальную вариабельность, обусловленную микрорельефом, гидротермическими градиентами и биотическими факторами, что особенно критично для выявления «горячих точек» эмиссии [3].

Глава 2. Объект и методы исследования.

2.1 Объекты

2.1.1 Физико-географические условия территории

Для проведения исследования был выбран парк имени Ивана Ивановича Бабушкина, расположенный в Невском районе Санкт-Петербурга. В условиях плотной городской застройки рядом с метро Ломоносовская парк представляет собой важную рекреационную зону, куда приходят отдохнуть жители прилегающих кварталов, а также съезжаются жители других районов и гости города, т.к. здесь расположены увеселительные аттракционы для детей «Мир сказок».

С географической точки зрения парк находится в пределах Приневской низменности. Рельеф территории ровный, с незначительными колебаниями высот — перепады составляют не более 3–5 метров. Поверхность имеет общий уклон в сторону реки Невы.

Климат данной территории, как и города в целом, относится к умеренно морскому типу с признаками перехода к умеренно континентальному. Он характеризуется относительно прохладным летним периодом, в течение которого средняя температура воздуха в июле составляет порядка +19 °С, и мягкой, влажной зимой со средней температурой января около –6 °С. Годовое количество атмосферных осадков варьируется в пределах 600–700 мм, при этом осадки распределяются по сезонам достаточно равномерно, что способствует стабильному увлажнению почвенного покрова на протяжении всего года.

Почвенный покров территории преимущественно представлен дерново-подзолистыми и аллювиально-дерновыми почвами, сформированными на водно-ледниковых и аллювиальных отложениях. В условиях городской среды почвы парка подверглись значительным антропогенным изменениям: отмечается уплотнение, загрязнение тяжёлыми металлами, нарушение

структуры профиля, что характерно для урбанизированных территорий. Тем не менее, наличие развитого растительного покрова способствует сохранению части естественных функций почвы, в том числе процессов накопления и выделения углекислого газа.

Гидрологические условия формируются за счёт близости к системе Невы и Волковки, а также за счёт атмосферных осадков. Подземные воды залегают на глубине 2–5 метров, в отдельных местах возможны локальные подтопления в весенний и осенний периоды.

Таким образом, физико-географические условия парка им. Бабушкина определяются сочетанием равнинного рельефа, умеренно влажного климата и антропогенно-преобразованных почв, что необходимо учитывать при анализе эмиссии углекислого газа из почвы.

На рисунке 2 представлено территориальное расположение парка им. Бабушкина. В ходе работы парк был разделен на 8 площадок в зависимости от влияния таких факторов как расположение объекта относительно транспортных магистралей, рельефа территории, промышленных предприятий, гидрологических особенностей, а также наличия и характера развития древесно-кустарниковой и травянистой растительности.

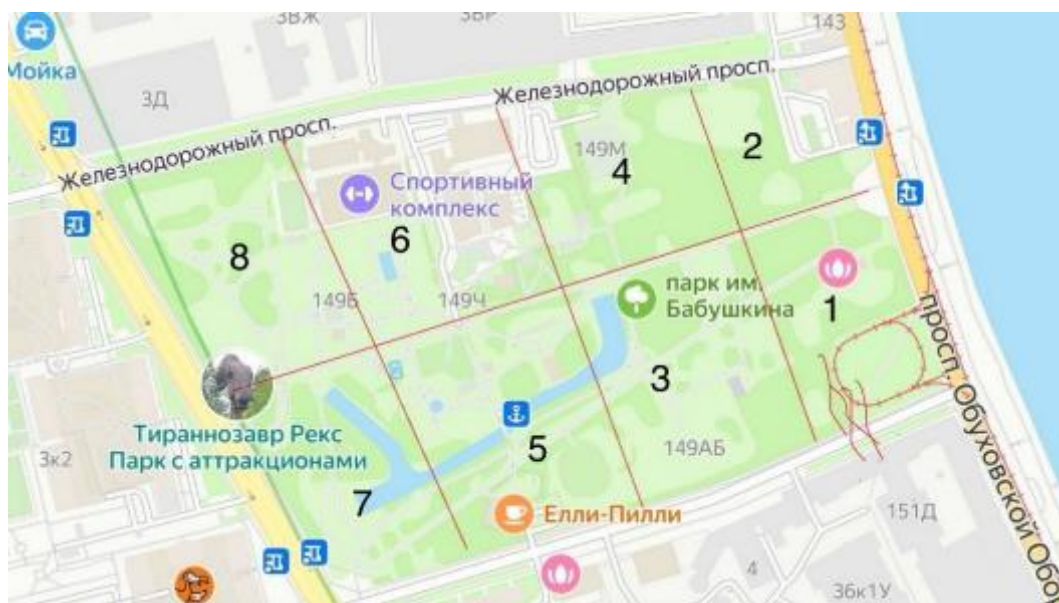


Рисунок 2 – Участки исследования в парке им. Бабушкина

2.1.2 Характеристика участков парка им. Бабушкина и их вклад в эмиссию диоксида углерода

Ниже приведена таблица, включающая в себя фотографии участков в парке, территориальное расположение относительно изучаемого парка, оценку состояния экосистемы на территории участка, тип древесно-кустарниковой растительности и травянистый покров, а также оценку антропогенного воздействия.

Таблица 1 – Характеристика и фотографии изученных участков

№ участка	Фото участка	Характеристика участка
1		Участок в восточной части парка характеризуется древесно-кустарниковой растительностью и развитым травостоем. Древесный ярус представляют клён остролистный, липа, берёза и тополь. Кустарниковый слой — сирень и спирея. Травостой — одуванчик, подорожник и клевер. Капитальные сооружения отсутствуют, отмечены тропинки и следы колеи. Вблизи проходит трамвайная линия, создающая фоновое техногенное воздействие. Участок сохраняет природоподобный облик и выполняет буферную функцию.
2		Участок в восточной части парка отличается смешанной растительностью, включающей древесно-кустарниковый и травяной компоненты, формирующие устойчивую экосистему. Древесный ярус представлен тополями и ивами, а кустарниковый слой — шиповником, черёмухой, но выражен слабо. Травяной покров состоит из клевера и одуванчиков, что свидетельствует о благоприятных условиях для наземной растительности.
3		Южный участок обладает смешанным типом растительности с древесно-кустарниковым и травяным ярусами. В древесном ярусе преобладают тополь (<i>Populus</i> spp.) и клён (<i>Acer</i> spp.). Травостой включает клевер (<i>Trifolium</i> spp.) и луговые виды, указывающие на устойчивые наземные условия.

		Антропогенное воздействие минимально: присутствуют только тропа и малая архитектурная форма. Кустарники сосредоточены по краям участка, возможно присутствие шиповника (<i>Rosa</i> spp.) и черемухи (<i>Padus</i> spp.). Постройка используется в рекреационных целях, но значимого влияния на среду не оказывает. В целом участок сохраняет природоподобные характеристики.
4		Участок в северной части парка характеризуется древесно-кустарниковой растительностью с развитым травяным покровом, формирующим естественную лесную экосистему. Преобладают лиственные деревья: клёны и, возможно, дубы, а подлесок включает кустарники: лещину или бузину. Травяной покров состоит из разнообразных трав и растений, таких как клевер и одуванчики, хорошо адаптированных к полутени. Умеренное воздействие человека проявляется в наличии грунтовой тропы и следов пешеходного движения, при этом участок сохраняет естественное состояние без значительного загрязнения или изменения ландшафта.
5		Участок расположен в южной части парка, характеризуется преобладанием древесно-кустарниковой растительности с присутствием развитого травяного яруса. Древесный компонент представлен лиственными породами, среди которых: береза повислая (<i>Betula pendula</i>), ивы (<i>Salix</i>) и клена (<i>Acer</i>). Травостой сформирован, предположительно, мятликом (<i>Poa</i>) и овсяницей (<i>Festuca</i>), широко применяемыми в городских озеленительных посадках. На территории присутствует водоём с участками прибрежной растительности, в котором обитает дикая утка (<i>Anas platyrhynchos</i>). Степень антропогенного воздействия оценивается как средняя: наличие пешеходной инфраструктуры, игровой площадки и малых архитектурных форм. Сохраняются участки с естественной растительностью, способствующие поддержанию экологической устойчивости территории. Данный участок выполняет одновременно

		рекреационную и природоохранную функции.
6		Рассматриваемая территория в южной части парка отличается преобладанием древесно-кустарниковой растительности, включающей взрослые деревья (берёзы), и густой подлесок с цветущими кустарниками. На территории расположен парк развлечений, при этом природная среда остаётся относительно нетронутой. Открытые пространства покрыты травяными сообществами, возможно, с видами, характерными для парков. Сочетание природных и антропогенных элементов указывает на сбалансированный ландшафт.
7		Участок расположен в южной части парка, характеризуется древесно-кустарниковым типом растительности с преобладанием открытых травяных пространств. Древесный ярус представляет лиственные породы - берёза (<i>Betula</i> spp.). Травяной покров, состоит из мятлика (<i>Poa</i> spp.) и клевера (<i>Trifolium</i> spp.), обеспечивая плотное покрытие. Антропогенное воздействие оценивается как умеренное: наличие водоёма и близость жилых зданий свидетельствуют о контролируемом использовании территории. Водоём поддерживает гидрофильные виды, такие как рогоз (<i>Typha</i> spp.) или тростник (<i>Phragmites australis</i>), вдоль берегов. Отсутствие значительных инфраструктурных объектов в непосредственной близости указывает на сохранение естественного состояния экосистемы.
8		Расположен в западной части парка, характеризуется древесно-кустарниковым типом растительности с преобладанием открытых травяных участков. древесный ярус включает в себя лиственные породы, в то время как травяной покров преимущественно состоит из мятлика и овсяницы. Антропогенное воздействие на данном участке умеренное: асфальтированная дорога, декоративные элементы и близость жилых зданий свидетельствуют о рекреационном использовании территории. кустарниковый слой включает отдельные экземпляры спиреи вдоль дорожек.

Исследованные участки отличаются преобладанием древесно-кустарниковой растительности с разнообразным травостоем. Основу растительности составляют лиственные деревья (клён, берёза, тополь, ива), кустарники (шиповник, спирея, черёмуха), а также устойчивые луговые травы (клевер, мятлик, овсяница).

Антропогенное влияние варьируется от минимального до умеренного. В ряде случаев наблюдаются рекреационные элементы (дорожки, площадки, постройки), но природная среда сохраняется. Особенно выделяется участок с парком развлечений (№6) и участки с водоёмами (№5, 7), способствующие биоразнообразию.

Таким образом, все участки сохраняют экологическую устойчивость и выполняют природоохранные, буферные и рекреационные функции.

2.1.3 Описание климатических показателей

Температура и осадки играют важную роль в биологической активности почв. Характер динамики среднесуточной температуры воздуха в вегетационный период 2024 года описывался волнообразной кривой. В мае наблюдается значительное повышение температур. Количество осадков в мае снижалось от начала месяца к его концу, а температура воздуха возрастала в среднем от 8-10 °С до 15-20 °С. Июнь характеризуется стабильным и плавным увеличением среднесуточной температуры, которая варьировала от +19°С в первой декаде до +22°С к концу месяца. Данный месяц соответствует климатическим нормам начала лета. Температурный режим устойчив, что благоприятно сказывается на биологических процессах в экосистемах. В июле, в течение первых двух декад, наблюдали максимальные средние температуры воздуха, достигавшие в дневное время значений +24°С. С третьей декады июля отмечено снижение среднесуточной температуры воздуха до +21°С.

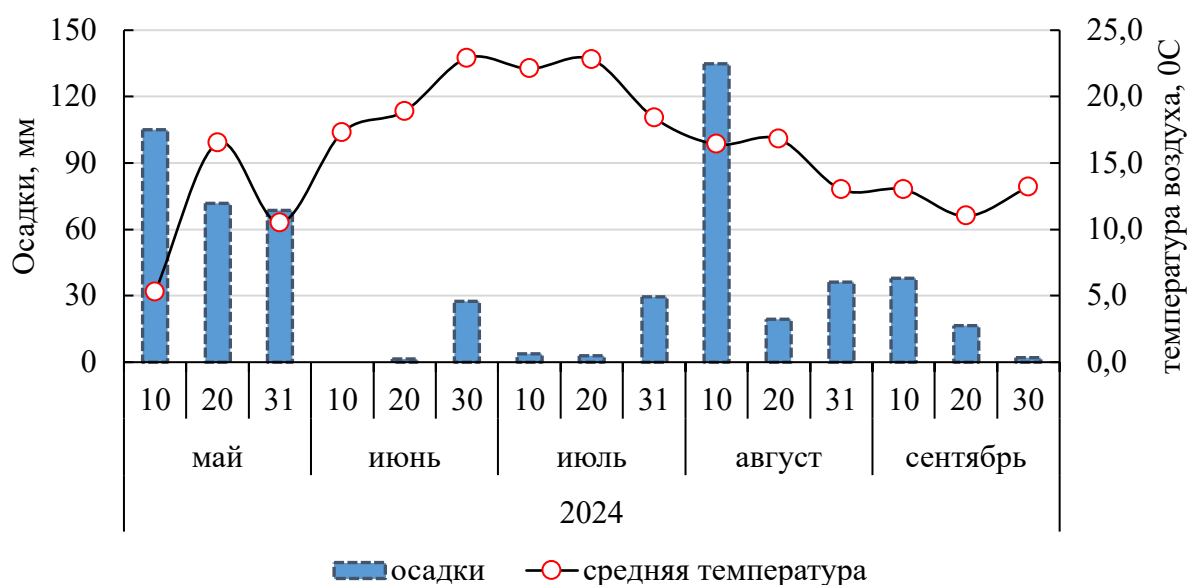


Рисунок 3 – Климатические показатели местности за вегетационный период 2024 года

В то же время, в данные месяцы наблюдалось снижение количества выпавших осадков. Данное сочетание должно было снизить биологическую активность почв, т.к. в сухой почве складываются неблагоприятные условия для микроорганизмов. Август оказался теплым месяцем. Среднесуточная температура оставалась на протяжении всего месяца на уровне +15-20°C. В этот же месяц выпало максимальное количество осадков, так в первой декаде месяца – до 130 мм.

2.1.4 Почвенный покров парка

В настоящее время почвы парка представлены перемешанными насыпными слоями различных грунтов, содержащими гумусовые горизонты, под которыми находятся остатки естественных почв [5]. В международной классификации WRB все городские почвы относятся к реферативной группе Техносолей [21].

Почвенный покров парка отличается выраженной мозаичностью. Целенаправленные изменения почвенного слоя были обусловлены посадкой

декоративной растительности, осуществлением мелиорации, созданием водоемов, прокладкой дорожек, а также возведением инженерных объектов.

В парке выделяются:

(1) урбостратоземы - почвы с органическим горизонтом, нанесенным на техногенные грунты; Поверхность урбостратозема в пределах парковых полей в основном покрыта мхами, злаками и разнотравьем. В качестве древесной растительности встречаются клены и липы. Также присутствует прошлогодний опад — листья и ветки.

(2) абрадированные почвы – в почвах удален гумусовый горизонт, а на дневную поверхность выходит срединный;

(3) стратоземы, формирующиеся под травянистой растительностью вблизи водоемов.

Исходя из различий растительности и условий почвообразования были выбраны 3 участка: 1- урбостратозем, 2- аброзем и 3 – стратозем (рисунок 4).



Рисунок 4 - Схема расположения участков с различным почвенным покровом в парке им. Бабушкина для изучения эмиссии парниковых газов.

Неоднородность почв приводит к неоднородности параметров углеродного баланса, а также к различиям в их биологической активности и эмиссии парниковых газов. Таким образом, для более точного изучения почв

парка им. Бабушкина были выбраны участки, изображенные на рис. 4, так как именно эти участки менее всего подвержены антропогенному воздействию.



U1 (0–22 см), серовато-бурого цвета, влажный, плотный, мелко- и средне комковатый, легкосуглинистый. В данном горизонте присутствуют многочисленные включения антропогенного происхождения — корни растений, а также обломки кирпича, стекла и камней.

U2 (22–35 см), слои бурого, серого и коричневого цвета, влажный, крупнокомковатый, плитчатый и плотностью. Среди включений встречаются корни растений, кирпич, уголь, а также фрагменты керамики.

Рисунок 5 – Урбостратозем серогумусовый легкосуглинистый



U1 (0 – 10 см), желтовато-коричневый, пятнами, увлажненный, плотный, бесструктурный, песчаный, много камней, редкие корни растений, переход четкий по цвету, граница неровная;

U2 (10 – 35 см), желтовато-коричневый, много щебня, отличается от предыдущего плитчатостью и плотностью. В горизонте отмечены единичные включения кирпича, угля и корней

Рисунок 6 – Аброзем песчаный



U1 (0–13 см) представлен тёмно-серым с сизыми пятнами цветом, крупнокомковатый, плотный, увлажнённый, среднесуглинистый, корни растений, включения антропогенного характера. Переход к следующему горизонту четкий, граница неровная

U2 (13–23 см), слои светло-серого и желтовато-коричневого цвета, увлажненный, плитчатый, плотный, присутствуют слои песка и сизой глины. Включает фрагменты кирпича, угля, глины, а также отдельные корни

UG (23–44 см) имеет переход четкий по цвету с неровными границами. Представлен сизым цветом, влажный, плотный с глыбистыми отдельностями, встречаются мелкие валунчики, тяжелый суглинок, встречаются единичные включения корней.

Рисунок 7 – Стратозем серогумусовый глееватый (урбаноземы)

В экологических исследованиях гранулометрический состав используется для оценки потенциала почвы к эмиссии CO_2 , поскольку преобладание мелких фракций (глины) может способствовать накоплению органического вещества и усилению микробной активности. Анализ гранулометрического состава позволяет глубже понять процессы углеродного цикла и разрабатывать меры по сохранению экологического баланса в условиях антропогенного воздействия.

Ниже приведена таблица 2, в которой содержатся данные о гранулометрическом составе верхнего гумусового горизонта урбаноземов парка им. Бабушкина мощностью 0–10 см.

Гранулометрический состав варьируется: на участках 1, 2, 5 и 6 преобладает супесь, фракции которой обеспечивают хорошую аэрацию почвы, тогда как участки 3, 4, 7 и 8 представлены лёгкими суглинками с повышенным содержанием илистых и глинистых фракций ($<0,05$ мм), что говорит об улучшенной влагоёмкости и удержанию органического вещества на их территории.

Таблица 2 — Гранулометрический состав верхнего гумусового горизонта урбаноземов парка (0–10 см)

Размер	Участок							
	Уч 1	Уч 2	Уч 3	Уч 4	Уч 5	Уч 6	Уч 7	Уч 8
>10	0	0	0	0	0	0	2,99	0
10,0-5,0	2,08	0,75	0,97	0,18	0	1,06	0,62	0,18
5,0-2,0	1,65	1,13	0,51	0,03	0,82	0,63	0,40	0,03
2,0-1,0	4,19	3,28	4,66	0,82	2,33	3,34	2,84	0,82
1-0,5	2,76	2,73	2,89	0,75	2,34	2,92	2,73	0,75
0,5-0,25	3,38	6,76	5,535	2,355	5,59	5,945	6,37	2,355
0,25-0,1	31,535	28,025	21,505	16,875	25,175	28,025	23,63	16,87
0,1-0,05	28,62	30,145	30,56	35,325	38,35	35,74	27,70	35,32
0,05-0,01	8,675	9,22	9,935	23,895	7,855	7,64	9,85	23,895
0,01-0,005	5,98	2,07	3,055	7,97	2,15	5,015	4,94	7,97
<0,005	11,13	15,89	20,385	11,795	15,39	9,675	17,95	11,795
>0,01	74,2	72,8	66,6	56,3	74,6	77,7	67,3	56,3
<0,01	25,8	27,2	33,4	43,7	25,4	22,3	32,7	43,7
ГМС	супесь	супесь	л.сугл	л.сугл	супесь	супесь	л.сугл	л.сугл

Кроме того, для определения биологической активности важно учитывать реакцию почвенной среды. В таблице 3 представлены данные по кислотности почв участков.

Таблица 3 — pH среды в почвах участков парка им. Бабушкина

Уч 1	Уч 2	Уч 3	Уч 4	Уч 5	Уч 6	Уч 7	Уч 8
7,2	7,3	6,8	6,9	7,1	7,3	6,9	6,8

Реакция почвенной среды (pH) оказывает значительное влияние на физико-химические свойства почв, их гранулометрический состав и эмиссию диоксида углерода (CO₂). В условиях нейтрального pH, характерного для городских почв, таких как в парке им. Бабушкина, создаются оптимальные условия для микробной активности, что может усиливать разложение органического вещества и увеличивать эмиссию CO₂, особенно на суглинистых участках (№3, №4, №7, №8) с высокой влагоёмкостью. На супесчаных участках (№1, №2, №5, №6) влияние pH может быть менее

выраженным из-за хорошей аэрации, но при смещении pH в кислую или щелочную сторону микробная активность может снижаться, что приводит к замедлению эмиссии CO₂. Таким образом, pH выступает важным фактором, регулирующим углеродный цикл в урбанизированных почвах, и требует учёта при разработке мер по их управлению.

Оценка pH в контексте ГМС показывает, что супесчаные участки (1, 2, 5, 6) демонстрируют значения pH в диапазоне 7,1–7,3, что соответствует слабому нейтральному диапазону, благоприятному для микробной активности благодаря хорошей аэрации и низкой способности к накоплению кислот. Напротив, на суглинистых участках (3, 4, 7, 8) pH колеблется в пределах 6,8–6,9, что указывает на слабокислую или нейтральную среду, где высокая влагоёмкость и содержание глины могут способствовать локальному изменению кислотности под влиянием антропогенных факторов.

Значение pH оказывает значительное влияние на состояние почв парка им. Бабушкина, определяя микробную активность, структуру почвы в зависимости от ГМС и интенсивность эмиссии CO₂, при этом нейтральный pH на супесчаных участках способствует высокой эмиссии, а слабокислый pH на суглинистых участках может её ограничивать.

Оценка вклада городских зеленых насаждений в снижение эмиссии углерода требует разработки метрик, позволяющих количественно определить выбросы углерода на единицу площади зеленых зон и на единицу покрытия крон деревьев для различных типов насаждений, включая парки, уличные озеленения и сады. Исследования, направленные на количественный анализ эффектов сокращения эмиссии углерода и оксида азота в зависимости от типа зеленых насаждений, остаются недостаточно распространенными. Особое значение имеет изучение потенциала городских парков в снижении выбросов углерода и разработка соответствующих рекомендаций по их проектированию, поскольку парки способны формировать обширные зеленые пространства на ограниченных городских территориях, существенно способствуя поддержанию и усилению поглотительной способности углеродных резервуаров.

2.2 Методы

Определение содержания общего углерода по методу Тюрина

Определение органического углерода осуществлялось по методу Тюрина при помощи мокрого озоления с использованием хромовой смеси в термостойких колбах при температуре 140°C в термостате. Количественное определение углерода, входящего в состав органического вещества, осуществлялось по объему невосстановленного бихромата калия, остаток которого устанавливали титриметрическим методом с применением соли Мора и фенилантраниловой кислоты в качестве индикатора [10].

Определение гранулометрического состава почв

Гранулометрический состав почвы определялся изначально ситовым методом. Во время использования данного метода необходимо взять пробу грунта весом 300 граммов, после чего просеять через сита. Набор сит включает в себя различные диаметры, составляющие 10; 5; 2; 1; 0,5; ,25; 0,1. Те фракции грунта, которые задержались на сите и не просочились через него, необходимо взвесить и рассчитать процентное содержание этой фракции к отношению отобранного ранее грунта. Также в процессе гранулометрического метода применялся ареометрический метод при исследовании ГМС глинистых частиц, размер которых составляет менее 0,1 мм. Этот метод основан на зависимости, которая существует между скоростями падения частиц и их размером [15].

Определение реакции почвенной среды по величине водородного показателя

Величина водородного показателя солевой вытяжки из почв (рН KCl) при отношении почвы к воде 1:5 и определении рН с помощью рН-метра [29].

Определение биологической активности почвы и субстрат-индуцированного дыхания почвы (СИД)

Биологическая активность микробной биомассы - степень интенсивности биохимических процессов. Определяется по количеству выделившегося углекислого газа, продуцируемого микроорганизмами за один

час из одного килограмма почвы: 4 г воздушно-сухой почвы, помещают в герметично закрывающиеся флаконы объемом 40 мл, добавляют дистиллированную воду до уровня влажности, соответствующего структурообразованию (0,64 мл для супесчаных и 0,61 мл для суглинистых почв). Образцы инкубируют в биологическом шкафу при температуре +28 °С в течение 24 часов. Содержание CO₂ в пробе определяют с использованием газового хроматографа, оснащенного детектором теплопроводности.

После первичного анализа в каждый флакон вносят 5% раствор глюкозы, тщательно перемешивают и вновь инкубируют при температуре +22 °С в течение 3 часов. За указанный период происходит биологическое окисление глюкозы почвенной микрофлорой без учета ее использования на рост микробной биомассы. Определение количества микробного углерода (Смик, мкг С/г почвы) производится по формуле: СИД × 40,04 + 0,37, где СИД — содержание CO₂, полученное в ходе анализа [22].

Определение эмиссии CO₂ методом закрытых камер

Для определения эмиссии диоксида углерода использовался широко применяемый в мире метод закрытых камер. В исследовании используются пластиковые ведра, в дно которых встроены трехходовые краны, обеспечивающие возможность отбора проб воздуха при помощи шприцов. После чего необходимо зафиксировать конструкцию на протяжении одного часа на поверхности почвы, для этого они заглубляются в почву на глубину от 3 до 10 см. при этом почвенное покрытие вокруг камеры уплотняется с целью предотвращения поступления атмосферного воздуха во внутреннюю часть камеры.

Образцы воздуха из камеры отбирают с помощью 60-мл шприца через 3-ходовый кран и помещаются в 10-мл пенициллиновые флаконы, герметично закрытые крышками. Для этого в резиновую пробку на плотно закрытом флаконе вставляют две медицинские иглы. Через одну из игл во флакон вводится образец воздуха в объеме 40 мл, который медленно «вытекает» через вторую иглу, тем самым «промывая» флакон. Когда в шприце остается 10 мл образца воздуха, вторую иглу вынимают из пробки флакона и с усилием вводят

оставшиеся 10 мл образца во флакон, создавая в нем избыточное давление. Флаконы с образцами воздуха доставляются в лабораторию для проведения хроматографического анализа на хроматографе Кристаллюкс 4000М, Россия [3].

Глава 3. Полученные результаты

3.1 Содержание общего углерода

Для проведения анализа эмиссии диоксида углерода из почв парка им. Бабушкина необходимо учитывать содержание органического углерода в почвенной массе на даты осуществления измерений выбросов парниковых газов. Также представляет интерес различия показателей между участками и временными интервалами наблюдений.

Данные о содержании органического углерода в почвах на выбранных участках парковой территории представлена на рисунке 8.

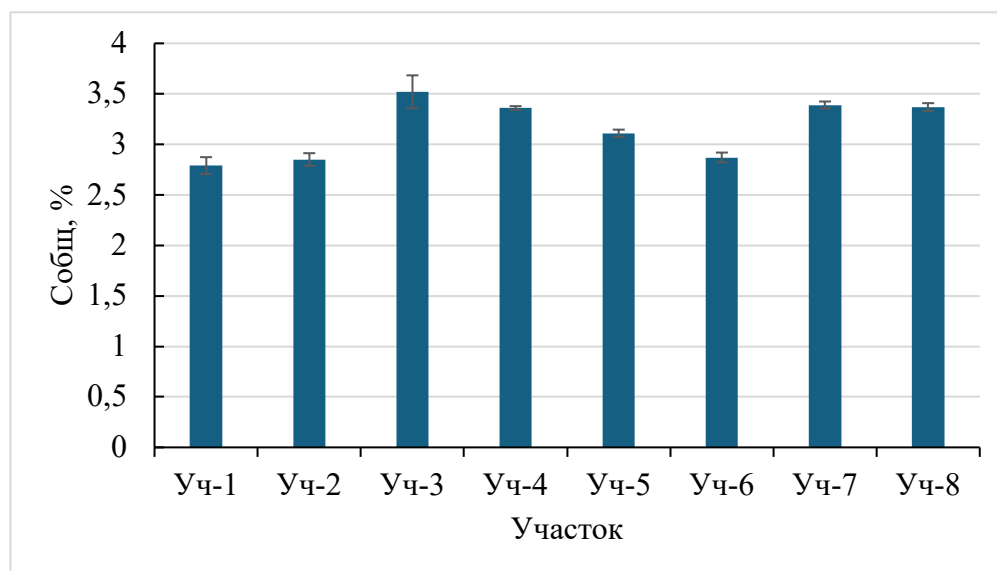


Рисунок 8 – Содержание общего углерода (в %) в почвах парка

Измерения содержания данного показателя проводилось в образцах почв, отобранных 19 мая 2024 года. В рамках работы было выделено восемь участков, на каждом из которых осуществлялся отбор до трёх средних почвенных проб весом 300 гр., из которых далее был составлен один общий образец, проанализированный в 5-ти кратной повторности. Полученные данные были подвергнуты расчетам, в результате которых определены средние значения содержания общего углерода. Итоговые показатели были

систематизированы и представлены в табличной форме. На основе полученных данных была построена диаграмма (рис. 8), позволившая визуализировать распределение $C_{\text{общ}}$ в пределах изучаемой территории. Анализ результатов показал неоднородность содержания углерода в почвах различных участков. Повышенная концентрация общего углерода зафиксирована на участке №1, где составила 2,79 %. Аналогично первому, второй и шестой участок также относятся к территории с повышенным содержанием общего углерода, составляя при этом 2,85 г/кг и 2,87 г/кг соответственно, что указывает на наличие благоприятных условий для накопления органического вещества в этих зонах.

При этом более высокий уровень содержания $C_{\text{общ}}$ выявлен на остальных участках: участок №3–3,52 г/кг, участок № 4–3,36 г/кг, участок №5–3,11 г/кг, участок №7–3,39 г/кг, участок №8–3,37 г/кг. Эти значения могут свидетельствовать о повышенной биологической активности, наличии растительного покрова с высоким уровнем гумусообразования или антропогенных факторов, способствующих накоплению углерода.

Проведённый анализ указывает на значительную вариабельность содержания общего углерода в почвах парка им. Бабушкина. Несмотря на разницу в показателях между участками, общее содержание углерода в большинстве проб характеризуется как повышенное. Это свидетельствует о хорошем экологическом состоянии почвенного покрова и высоком потенциале почв парка к устойчивому углеродному балансу.

3.2 Биологическая активность

Биологическая активность почвы представляет собой совокупность процессов, осуществляемых почвенными микроорганизмами и фауной, обеспечивающих разложение органического вещества. Этот показатель отражает интенсивность метаболизма в почвенной среде и напрямую связан с эмиссией CO_2 . Высокая биологическая активность способствует ускоренному

минерализованию углерода. Таким образом, она служит индикатором экологического состояния почвы и ее участия в углеродном цикле.

Таблица 4 — Сезонная динамика продуцирования урбаноземами CO₂ в почвах разных участков парка

	19 май	18 июн	19 июл	20 авг	19 сен	среднее	ст.откл
Уч-1	222,3	181,1	163,4	175,3	154,2	179,26	26,2
Уч-2	230,5	173,9	158,9	162,7	149,7	175,14	32,1
Уч-3	287,1	207,3	187,4	194,1	178,2	210,82	43,9
Уч-4	293,4	227,6	193,7	199,3	184,5	219,7	44,2
Уч-5	237,4	178,7	156,3	166,7	147,1	177,24	35,6
Уч-6	240,6	178,5	142,3	160,4	133,1	170,98	42,6
Уч-7	291,4	220,5	197,8	201,8	188,6	220,02	41,6
Уч-8	286,2	221,2	185,2	196,4	176,2	213,04	44,2
Среднее/уч.	261,1	198,6	173,1	182,1	164,0		

Как видно из представленной таблица, динамика продуцирования углекислого газа из почв существенно варьировала, как по датам изучения, так и по участкам исследования. В мае наибольшее количество CO₂ отмечалось на участках 4 и 7, которое достигало 293 и 291 мг/кг/сутки, соответственно. Наименьшее количество – из участков почв 1 и 2 – до 222 и 230 мг/кг/сутки. Далее, в связи с повышением температуры воздуха, но и снижением количества осадков – биологическая активность снижалась, в среднем на 15-20%. Наименьшей биологической активностью почвы парка отличались в июле, так на участке 6 их величина составила в среднем 142 мг/кг/сутки. В августе, с увеличением количества осадков биологическая активность вновь возросла, а в сентябре, в связи со снижением среднесуточной температуры воздуха – вновь уменьшилась.

На основании таблицы 2, в которой приведены полученные результаты о сезонной динамике продуцирования урбаноземами CO₂, был построен график, изображенный на рис. 9, в котором представлены средние значения биологической активности в почвах изучаемых участков.

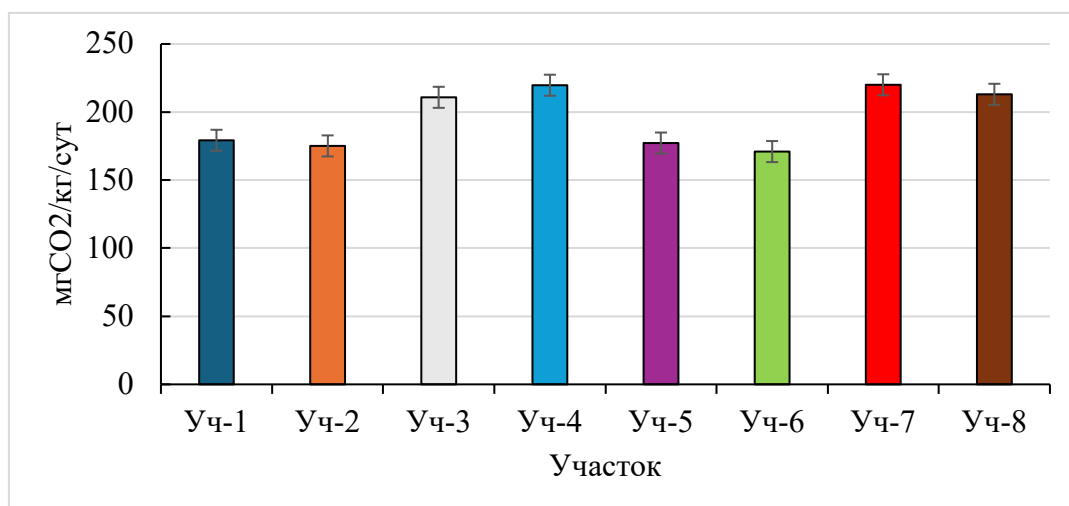


Рисунок 9 — Выделение CO₂ в среднем за вегетационный период 2024 года с мая по сентябрь

Исследование выявило значительные различия в продуцировании CO₂ между участками урбаноземов, что связано как с сезонными факторами, так и с воздействием загрязнителей. Участки №7 (220,02 мг/кг/сутки) и №4 (210,82 мг/кг/сутки) демонстрируют наивысшую биологическую активность, что может быть обусловлено меньшей загрязненностью. И достаточным содержанием органического вещества. Напротив, участки №6 (170,98 мг/кг/сутки) и №2 (175,14 мг/кг/сутки) указывают на возможное подавление микробной активности под влиянием антропогенных загрязнителей. Полученные данные подчеркивают важность учета экологического состояния урбаноземов при оценке их функциональных свойств.

3.3 Углерод микробной биомассы

Углерод микробной биомассы (УМБ) представляет собой количественную характеристику углерода, содержащегося в живых микроорганизмах (бактериях, грибах и др.) почвы, и служит индикатором биологической активности. В рамках исследования эмиссии диоксида углерода (CO₂) в почвах парка им. Бабушкина, расположенного в

урбанизированной среде Санкт-Петербурга, УМБ отражает вклад микробного сообщества в минерализацию органики и эмиссию CO_2 (в мг С/кг почвы).

В рамках исследования эмиссии диоксида углерода (CO_2) в почвах парка им. Бабушкина, расположенного в городской среде Санкт-Петербурга, были проанализированы три набора данных, характеризующих биологическую активность урбаноземов. Были получены данные о базальном дыхании (БД), измеряемом в мг CO_2 /кг/час (см. приложение 1), о субстрат-индуцированном дыхании (СИД), выраженном в мл CO_2 /100 г/час (см. приложение 2), а также об углероде микробной биомассы (Смик), измеряемом в мг С/кг почвы. Обновлённые данные о Смик представлены на рис. 10, а в таблице 3 представлено метаболическое частное $q\text{CO}_2$, являющийся отношением СИД к БД. Их анализ позволяет оценить влияние антропогенных факторов на микробную активность и углеродный баланс почв.

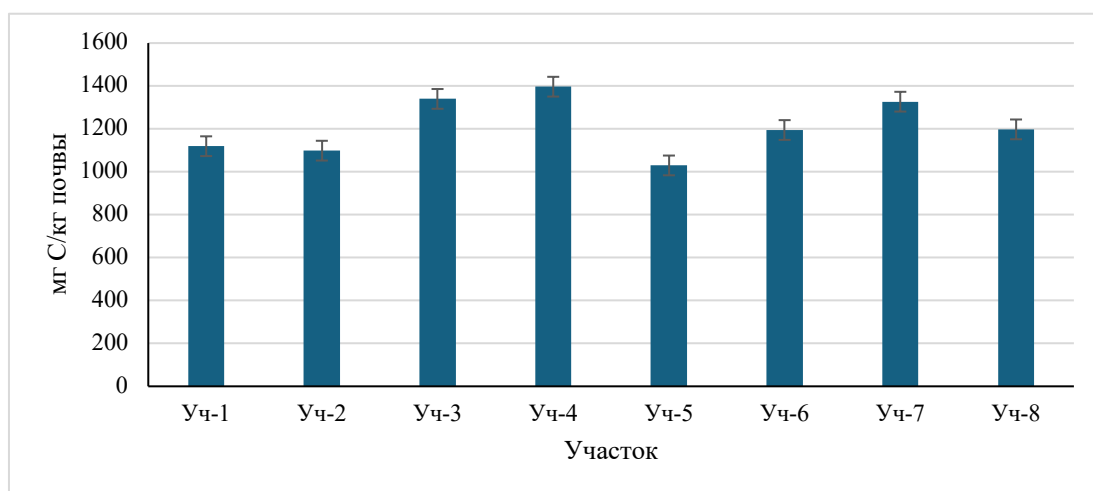


Рисунок 10 — Углерод микробной биомассы по участкам парка им. Бабушкина

Как видно из данного рисунка, наибольшее количество УМБ формировалось в почвах участка 4, которое в среднем достигало значений до 1400 мг/кг почвы. Далее по убыванию располагались следующие участки: У3 > У7 > У8 > У6 > У1 > У2 > У5. Наименьшее количество УМБ возможно

связано с отсутствием гумусового горизонта (аброземы) и высокой вытоптанностью.

Таблица 5 — Метаболическое частное

	БД	Смик	qCO ₂
Уч-1	7,469	1119,3	6,67
Уч-2	7,298	1098,5	6,64
Уч-3	8,784	1339,8	6,56
Уч-4	9,154	1396,7	6,55
Уч-5	8,877	1029,7	8,62
Уч-6	8,924	1185,9	7,53
Уч-7	9,168	1326,8	6,91
Уч-8	7,385	1197,8	6,17

Анализ данных выявил значительную пространственную неоднородность состояния микроорганизмов в почвах парка им. Бабушкина. Участки №3, №4 и №8, характеризующиеся минимальными значениями метаболического коэффициента qCO₂ (6,56 мг С/кг почвы, 6,55 мг С/кг почвы и 6,17 мг С/кг почвы соответственно), указывают на более благоприятные условия для микробного сообщества, что может быть обусловлено низким уровнем загрязнения или стабильным содержанием органического вещества. Участок №2, с наименьшим базальным дыханием (7,29 мг С/кг почвы), и №5, с минимальным СИД (1029,7 мг СО₂/кг почвы), также демонстрируют признаки низкого метаболического стресса. Напротив, участок №5, с максимальным qCO₂ (8,62 мг С/кг почвы), свидетельствует о повышенной метаболической нагрузке, вероятно, вызванной антропогенными факторами.

3.4 Эмиссия CO₂

По результатам измерений эмиссии диоксида углерода и закиси азота в период с 19.05.24 по 19.09.24 на участках 1, 2 и 3, которые были изображены ранее на рис. 4, были получены данные о суточной и кумулятивной эмиссиях

парниковых газов, на основе которых построены представленные ниже графики.

На рисунке 11 изображен график суточной эмиссии диоксида углерода (кг CO₂/га/день).

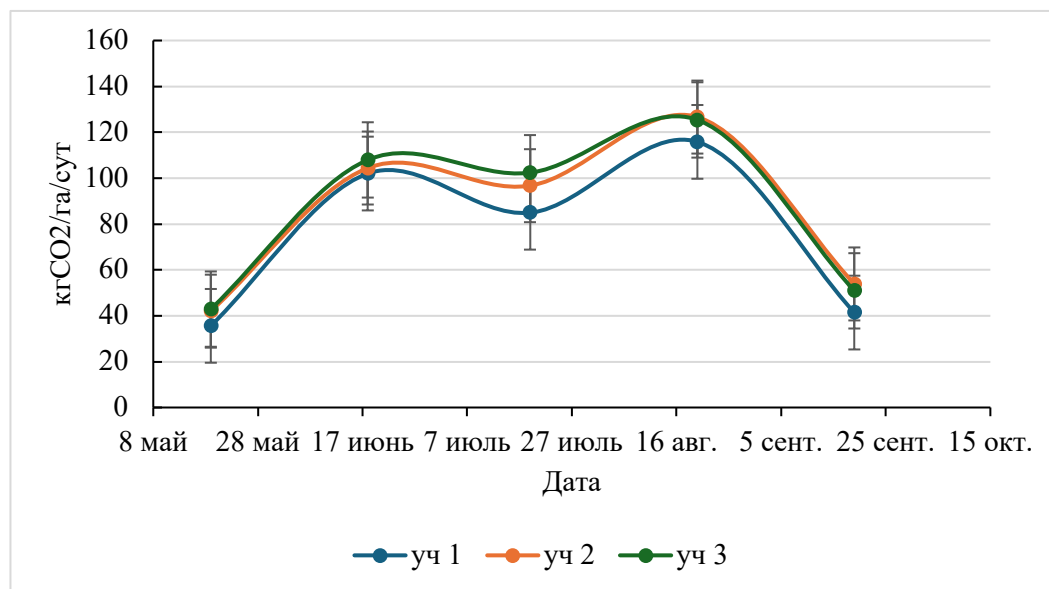


Рисунок 11 — График суточной эмиссии диоксида углерода (кг CO₂/га/день)

На протяжении 123 календарных дней наблюдений значения эмиссии диоксида углерода варьировались в диапазоне от 36 кг CO₂/га/день до 127 кг CO₂/га/день. В период с мая по июнь наблюдалось увеличение эмиссии, достигшее максимума на участке 3, где показатель составил 107,9 кг CO₂/га/день. Этот рост может быть обусловлен повышенным количеством осадков, зарегистрированных в указанный месяц, что способствовало избыточному увлажнению почвы и активизации микробной деятельности, играющей ключевую роль в генерации парниковых газов, включая CO₂. С июня по июль суточная эмиссия демонстрировала снижение, что, вероятно, связано с уменьшением влажности почвы из-за испарения под воздействием более высоких температур в июле. Наименьшее значение эмиссии в этот период было зафиксировано на участке 1 и составило 85 кг CO₂/га/день. С конца июля эмиссия начала возрастать на всех исследуемых участках,

достигнув пика на участке №2 с показателем 127 кг CO₂/га/день. К завершению августа и в сентябре, с понижением температуры и ослаблением активности микробного сообщества, эмиссия стабилизировалась на более низком уровне. Полученные данные подчёркивают значимость климатических факторов, таких как осадки и температура, в регуляции эмиссии CO₂.

На рисунке 12 отражен график кумулятивной эмиссии диоксида углерода (кг CO₂/га).

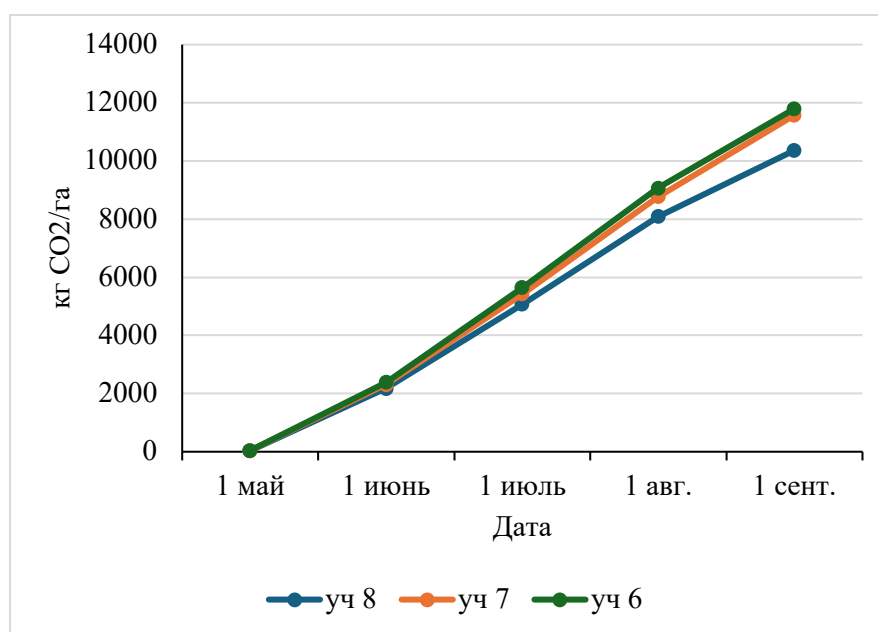


Рисунок 12 – График кумулятивной эмиссии диоксида углерода (кг CO₂/га)

Кумулятивная эмиссия CO₂ демонстрирует выраженную сезонную динамику с заметным увеличением значений на протяжении периода наблюдений. На начальной стадии (19 мая) эмиссия составляла 36,0–43,0 кг CO₂/га/день, что отражает низкую интенсивность процессов выделения CO₂, обусловленных умеренными климатическими условиями весеннего периода и ограниченной микробной активностью. Наиболее значительный рост наблюдался с 19 мая по 19 июля: на участке 1 эмиссия возросла с 36,0 до 5066,2 кг CO₂/га/день, на участке 2 — с 42,0 до 5428,7 кг CO₂/га/день, а на участке 3

— с 43,0 до 5640,7 кг CO₂/га/день. Этот рост может быть связан с повышением температуры и влажности в летний период, стимулирующим деятельность микробов, ответственных за разложение органического вещества. Пиковые значения кумулятивной эмиссии были зафиксированы 19 сентября на участке 1 (10356,3 кг CO₂/га/день) и участке 2 (11576,3 кг CO₂/га/день), что, вероятно, указывает на накопление CO₂ в результате длительного периода активного микробного метаболизма в условиях благоприятного увлажнения. Однако на участке 3 в тот же день произошло резкое снижение эмиссии до 1178,2 кг CO₂/га/день, что может быть обусловлено локальными факторами, такими как антропогенное воздействие (загрязнение или уплотнение почвы) или истощение субстрата, а также изменением микроклиматических условий.

Анализ данных выявил значительное увеличение кумулятивной эмиссии CO₂ на участках 1 и 2 в течение сезона, что подчёркивает влияние климатических факторов, таких как температура и влажность, на углеродный цикл, тогда как резкое снижение эмиссии на участке 3 к 19 сентября может свидетельствовать о воздействии антропогенных стрессоров.

Заключение

Изучена роль диоксида углерода в глобальном изменении экосистем на основании литературных источников. Выявлено, что к числу важнейших источников эмиссии CO₂, которому уделяют меньшее внимание, относятся почвы. Они выступают в качестве основного поглотителя и хранилища для активного углерода (C) в наземных экосистемах, но при этом выделяют CO₂ через почвенное дыхание. Баланс между поглощением и выбросами CO₂ в почве зависит от множества факторов, включая биоклиматические условия, почвенный покров и землепользование.

Изучен почвенный покров парка им. Бабушкина, представленный урбаноземами, сформировавшимися под воздействием антропогенной деятельности в процессе обустройства территории. Структура почвенного покрова отличается мозаичностью, где наиболее выражены мозаики, включающие урбостратоземы, абрадированные почвы и стратоземы, что отражает сложный генезис и неоднородность почв в условиях городской среды.

Установлено, что верхние гумусовые слои почв исследуемых участков содержат высокое количество органического углерода, особенно на участках №3, №4, №7 и №8, где содержание общего углерода превышало 3%. Также данные слои отличались нейтральной реакцией среды и легким гранулометрическим составом (от супесчаного до легкосуглинистого)

Биологическая активность почв исследуемых участков варьировала в течение вегетационного периода от 140 до 290 мг/кг/сутки в зависимости от месяца исследования. В среднем, наибольшая биологическая активность была выявлена на участках №7 и №4, которая достигала значений 220 мг/кг/сутки. Наименьшей биологической активностью отличались верхние слои участков 2, 5 и 6, достигая средних значений до 170 мг/кг/сутки.

Наибольшее количество углерода микробной биомассы формировалось в почвах участка 4, которое в среднем достигало значений до 1400 мг/кг почвы.

Далее по убыванию располагались следующие участки: $У3 > У7 > У8 > У6 > У1 > У2 > У5$.

Анализ состояния микроорганизмов в почвах парка им. Бабушкина выявил значительную пространственную неоднородность, с участками №3, №4 и №8, демонстрирующими низкие значения qCO_2 и благоприятные условия для микробной активности, тогда как участок №5 с высоким qCO_2 указывает на метаболический стресс.

На основе анализа данных установлено существенное увеличение кумулятивной эмиссии CO_2 на участках 1 и 2 в течение вегетационного периода, что указывает на значительное влияние климатических факторов, включая температуру воздуха и уровень влажности, на динамику углеродного цикла. В то же время резкое снижение показателей эмиссии на участке 3, зафиксированное к 19 сентября, может свидетельствовать о воздействии антропогенных стрессовых факторов на функционирование экосистемы.

Список литературы

1. Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах // (Под ред. Д.Г. Замолодчикова, Д.В. Карелина, М.Л. Гитарского, В.Г. Блинова) - Саратов: Амирит, 2017. 279 с.
2. Будыко, М. И. Влияние человека на климат. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. — 47 с.
3. Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Рижия Е.Я., Павлик С.В. Мониторинг эмиссии закиси азота из сельскохозяйственных почв. Методические рекомендации / СПб, ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт, 2008. 20 с.
4. Васенев В. И., Варенцов М. И., Саржанов Д. А., Махиня К. И., Госс Д. Д., Петров Д. Г., Долгих А. В. Влияние мезо- и микроклиматических условий на эмиссию CO₂ почв объектов городской зеленой инфраструктуры Московского мегаполиса // Почвоведение, 2023. № 9, С. 1089–1102.
5. Герасимова М. И., М.Н. Строганова, Н. В. Можарова, Т. В. Прокофьева; Под ред. Г.В. Добровольского; Рец.: В. Д. Василевская, Т. А. Трифонова; НМС по почвоведению: Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация. - Смоленск: Ойкумена, 2003. 143 с.
6. Доклад Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Карбоновые полигоны» // 2021. С. 4-14.
7. И Н. Глазкова, А А. Иванова, А А. Ключева, О С. Пьянова Анализ воздействия парниковых газов на окружающую среду: отечественный и зарубежный опыт // Вестник Академии знаний. 2024. №4 (63).
8. Исполнительный совет ВМО одобрил план глобального мониторинга парниковых газов // Климатический центр Росгидромета. — 2023. — URL: <http://cc.voeikovmgo.ru/ru/dokumenty/dokumenty-vmo/8-novosti/sobytiya/2137-ispolnitelnyj-sovet-vmo-odobril-plan-globalnogo-monitoringa-parnikovyykh-gazov>

9. Комитет по благоустройству Санкт-Петербурга. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/blago/territorii-zelenyh-nasazhdenij>.

10. Крейер К.Г., Банкаина Т.А., Орлова Н.Е., Юрьева Г.М. Практикум по агрохимическому анализу почв: Учеб. Пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. – 88 с.

11. Ларионова А.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Золотарева Б.Н., Евдокимов И.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата. - Почвоведение. 2010. № 2. С. 186–195.

12. Ларионова А.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Золотарева Б.Н., Евдокимов И.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия диоксида углерода из агросерых почв при изменении климата. - Почвоведение. 2010. № 2. С. 186–195.

13. Можарова Н.В., Кулачкова С.А., Лебедь-Шарлевич Я.И. Эмиссия и поглощение парниковых газов в почвах Москвы // Почвоведение. 2018. № 3. С. 372–384.

14. Парижское соглашение [Электронный ресурс] / Рамочная конвенция ООН об изменении климата. — [Б. м.], 2015. — URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.

15. Растворова О.Г. Физика почв: практическое руководство. Ленинград – Издательство Ленинградского университета, 1983. 193 с.

16. Саржанов Д.А., Васенев И.И., Валентини Р. Анализ пространственного разнообразия и временной динамики почвенных потоков парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в условиях представительных урбозкосистем г. Курска // АгроЭкоИнфо. 2015. №6. 10 с.

17. Семенов С.М. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. — М.: Росгидромет, 2012. 504 с.

18. Сухоруков В.В., Трубник Р.Е., Федоров Ю.А. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение метана почвами // Экологические проблемы. Взгляд в будущее. 2020. С. 610–619.
19. Шаповалов Л.Б. Энергопотребление на основе нанодеструкции углеродосодержащих отходов // Справочник эколога. - 2017. — № 3. - С. 76-85.
20. Экологи РУДН: 1 гектар городской почвы выделяет дополнительные 0,2 тонны CO₂ в год из-за повышенной температуры // Новости РУДН. — 2025. — URL: <https://www.rudn.ru/media/news/auka/ekologi-rudn-1-gektar-gorodskoy-pochvy-vydelyaet-dopolnitelnye-02-tonny-co2-v-god-iz-za-povyshennoy-temperatury>
21. [IUSS Working Group WRB. World ReferencesBase for Soil Resources 2006. First update 2007. World Soil Resources Reports, 103, FAO, Rome, 2007. В русском переводе: Мировая коррелятивная база почвенных ресурсов: основа для международной классификации и корреляции почв. М.: Товарищество научных издательств КМК, 2007. 278 с.]
22. Anderson, J.P.E., Domsh, K.H. 1989. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem., 10. P. 215-221.
23. Cai, Y., Xie, Y., Guo, Y., et al. Tundra methane emissions increase in the Eurasian Arctic due to amplification of regional warming [Электронный ресурс] // *npj Climate and Atmospheric Science*. – 2024. – Vol. 7, Article number: 72. – URL: <https://www.nature.com/articles/s42949-024-00172-x>
24. Callendar G.S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature// Quart. J. Royal Meteorol. Soc. - 1938. - Vol. 64. - P. 223-240.
25. Kokorin, A., & Korppoo, A. Contribution of natural and anthropogenic emissions of CO₂ and CH₄ to the atmosphere from the territory of Russia to global climate change in the 21st century [Электронный ресурс]. – [Academia.edu](https://www.academia.edu), 2021. — URL: https://www.academia.edu/63418484/Contribution_of_natural_and_anthropogenic

emissions of CO₂ and CH₄ to the atmosphere from the territory of Russia to global climate change in the 21st century

26. New Scientist. Земля прогрелась на 2°C в самый жаркий день за всю историю наблюдений [Электронный ресурс]. – URL: https://www.newscientist.com/article/2403743-earth-passes-2c-of-warming-on-hottest-day-ever-recorded/?utm_source=Live+Audience&utm_campaign=a0dbfbabdf-briefing-dy-20231120&utm_medium=email&utm_term=0_b27a691814-a0dbfbabdf-51941512
27. The Climate Change Initiative // European Space Agency. — 2025. — URL: <https://climate.esa.int/en/about-us-new/climate-change-initiative/>
28. Turetsky, M. R., Abbott, B. W., Jones, M. C., et al. Carbon release through abrupt permafrost thaw // *Nature Climate Change*. – 2020. – Vol. 10, pp. 84–90.
29. WMO Annual Greenhouse Gas Bulletin published // ICOS Carbon Portal. — 2016. — URL: <https://www.icos-cp.eu/event/473>
30. World Meteorological Organization. Global Atmosphere Watch (GAW) – Activity Areas [Электронный ресурс]. – WMO Community Platform, 2024. – URL: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/gaw>
31. World Meteorological Organization. Global Greenhouse Gas Watch Programme [Электронный ресурс]. – [WMO.int](https://wmo.int), 2024. – URL: <https://wmo.int/activities/global-greenhouse-gas-watch/global-greenhouse-gas-watch-programme>

Приложение

Приложение А

Таблица — Базальное дыхание, мгСО₂/кг/час

	19 май	18 июн	19 июл	20 авг	19 сен	среднее	ст.откл
Уч. 1	9,3	7,5	6,8	7,3	6,4	7,5	1,09
Уч. 2	9,6	7,2	6,6	6,8	6,2	7,3	1,34
Уч. 3	12,0	8,6	7,8	8,1	7,4	8,8	1,83
Уч. 4	12,2	9,5	8,1	8,3	7,7	9,2	1,84
Уч. 5	11,9	9,2	7,7	8,2	7,3	8,9	1,84
Уч. 6	11,3	10,4	7,9	7,7	5,5	8,6	2,31
Уч. 7	12,1	9,2	8,2	8,4	7,9	9,2	1,73
Уч. 8	9,9	7,4	6,5	6,9	6,1	7,4	1,48

Таблица — Субстрат-индуцированное дыхание, млСО₂/100г/час

	19 май	18 июн	19 июл	20 авг	19 сен	среднее	ст.откл
Уч-1	3,18	3,03	2,92	2,58	2,23	2,8	0,38
Уч-2	3,22	3,07	2,96	2,11	2,30	2,7	0,50
Уч-3	3,53	3,38	3,27	3,44	3,08	3,3	0,17
Уч-4	3,66	3,51	3,40	3,63	3,21	3,5	0,19
Уч-5	2,92	2,77	2,66	2,39	2,09	2,6	0,33
Уч-6	3,41	3,26	3,15	2,54	2,52	2,5	0,42
Уч-7	3,56	3,41	3,30	3,1	3,19	3,3	0,19
Уч-8	3,28	3,16	2,95	2,89	2,64	3,0	0,25