

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

УДК 502.175-027.21 504.5:001.891
Рег. № НИОКТР 123042000071-8

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе

_____ С. В. Микушев
«____ » 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ОТ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА К УГЛЕРОДНУМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ:
ПОТЕНЦИАЛ И ПУТИ РАЗВИТИЯ СЕКВЕСТРАЦИОННОЙ УГЛЕРОДНОЙ
ИНДУСТРИИ НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ
И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
(заключительный)

Руководитель НИР:
Профессор,
д-р биол. наук,
профессор, профессор РАН

_____ Е. В. Абакумов

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, профессор,
д.б.н.

подпись, дата

Е. В. Абакумов
(введение, заключение,
раздел 1, 2, 3, 4, 5, 10,
11, 12)

Отв. исполнитель, младший
научный сотрудник, к.б.н.

подпись, дата

В. И. Поляков
(введение, заключение,
раздел 1, 2, 3, 4, 5)

Исполнители:

Ведущий научный сотрудник,
к.ф.-м.н.

Д. В. Ионов
(введение, раздел 6)

Ассистент

подпись, дата

А. В. Заединов
(введение, раздел 10,
11, 12)

Старший научный сотрудник,
к.ф.-м.н.

подпись, дата

М. В. Макарова
(введение, раздел 6)

Младший научный сотрудник

подпись, дата

Т. И. Низамутдинов
(введение, раздел 1, 2,
3, 4, 5)

Профессор, д.э.н.

подпись, дата

Н. В. Пахомова
(введение, раздел 10,
11, 12)

Преподаватель

подпись, дата

С. Ч. Фока
(введение, раздел 6)

Доцент, к.б.н.

подпись, дата

Е. Ю. Чебыкина
(введение, раздел 1, 2)

Доцент, к.э.н.

подпись, дата

М. А. Ветрова
(введение, раздел 10,
11, 12)

Специалист

подпись, дата

Т. И. Земскова
(введение, раздел 2, 7,
8, 9)

Ведущий специалист, д.б.н.

подпись, дата

Н. Н. Камардин

Ведущий специалист, к.б.н.	подпись, дата	(введение, раздел 2 ,7, 8, 9)
Специалист	подпись, дата	А. Ю. Лянгузов (введение, раздел 2, 7, 8, 9)
Специалист	подпись, дата	С. Ф. Гордеева (введение, раздел 2, 7, 8, 9)
Специалист	подпись, дата	К. А. Смирнова (введение, раздел 2, 7, 8, 9)
Директор	подпись, дата	Т. А. Петрова (введение, раздел 2, 7, 8, 9)
Инженер	подпись, дата	Д. А. Самуленков (введение, раздел 2, 7, 8, 9)
Ведущий специалист	подпись, дата	М. В. Сапунов (введение, раздел 2, 7, 8, 9)
Старший научный сотрудник	подпись, дата	С. В. Сладкова (введение, раздел 2, 7, 8, 9)
Инженер-исследователь	подпись, дата	С. А. Коузов (введение, раздел 2)
Инженер-исследователь	подпись, дата	Ш. Сюй (введение, раздел 2)
Лаборант-исследователь	подпись, дата	Е. И. Походня (введение, раздел 1, 2, 3)
Научный сотрудник	подпись, дата	В. О. Крель (введение, раздел 6)
Лаборант-исследователь	подпись, дата	А. Р. Сулейманов (введение, раздел 2, 3)
		Е. П. Рябушко

(введение, раздел 6)

Инженер-исследователь

подпись, дата

Е. А. Артюхов
(введение, раздел 2, 3)

Научный сотрудник

подпись, дата

Н. Ю. Нестеренко
(введение, раздел 10,
11, 12)

Нормоконтроль

подпись, дата

Е. В. Басистая-
Прокопова

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 338 страницы, 99 рисунков, 55 таблиц и 443 источника литературы.
КЛИМАТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ГАЗЫ, ПОЧВЫ, ЮЖНАЯ ТАЙГА, КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ, УГЛЕРОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ, УГЛЕРОДНЫЕ РЫНКИ

На основе проведенных исследований в рамках создания карбонового полигона «Ладога» разработан комплексный подход к мониторингу углеродного баланса и оценке экологического состояния Балтийско-Ладожского региона. Функционирование проектируемого полигона осуществляется на базе стационарного и мобильных модулей, которые входят в действующую сеть атмосферного мониторинга, что позволяет проводить детальные исследования пространственно-временной динамики парниковых газов и верифицировать климатические модели. Трехлетняя реализация проекта включила мониторинг растительного и животного мира, анализ параметров углеродного цикла в южно-таежных экосистемах, оценку накопления почвенного органического вещества, применение машинного обучения для прогнозирования содержания металлов и их оксидов в почвах, моделирование трансформации органического вещества, оценку содержания аэрозолей в атмосфере и параметризацию углеродных экосистемных услуг.

Результаты исследований выявили значительный секвестрационный потенциал территории, особенно в полугидроморфных и гидроморфных ландшафтах с торфяными почвами, где запасы почвенного органического вещества достигают $60,0 \pm 19,8$ кг/м². Установлены закономерности динамики потоков CO₂ с сезонными вариациями и роль биогенного компонента в углеродном балансе урбанизированных территорий. Микробные сообщества почв демонстрируют четкую связь с эдафическими условиями, что подчеркивает важность учета их специфики при оценке углеродного цикла. Моделирование с использованием ROMUL подтвердило тенденцию к увеличению запасов органического вещества с течением времени, что указывает на высокий секвестрационный потенциал данной территории. Применение интерпретируемых моделей машинного обучения продемонстрировало высокую эффективность в прогнозировании содержания отдельных металлов и их оксидов в почвах, что важно для разработки стратегий охраны почвенных ресурсов.

Мониторинг аэрозольных частиц в атмосфере выявил устойчивую сезонную динамику и значительный вклад локальных антропогенных источников в загрязнение городской среды. Эксперименты с гуминовыми кислотами и водорослями, а также пресноводными раками подтвердили их перспективность для биоиндикации и мониторинга водных экосистем. Финансово-экономический анализ указал на необходимость

институциональных преобразований для декарбонизации естественно-монопольных секторов через синхронизацию регулирующих, стимулирующих и финансовых инструментов. Анализ сектора климатически-ориентированных проектов в Ленинградской области, а именно, карбонового фарминга показывает, что проекты облесения, направленные на секвестрирование углерода, обладают значительным потенциалом, однако их экономическая эффективность в современных условиях остается низкой из-за высокой стоимости капитала и недостаточной цены углеродных единиц. Для стимулирования развития таких проектов среди малого и среднего бизнеса необходимы меры государственной поддержки, включая субсидирование процентных ставок по кредитам и прямые компенсации затрат на посадку деревьев.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование методологической базы оценки углеродного потенциала, разработку усовершенствованных моделей секвестрации углерода и верификацию методов количественной оценки потоков парниковых газов. Реализация этих направлений требует интеграции междисциплинарных исследований, внедрения инновационных технологий мониторинга и создания научно-обоснованной нормативной базы, что в совокупности будет способствовать низкоуглеродному развитию региона.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	11
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	14
ВВЕДЕНИЕ	17
1 Проект карбонового полигона «Ладога»: принципы пространственного размещения мониторинговых площадок и концепция их функционирования.....	27
1.1 Концепт объединенного карбонового полигона «Ладога».....	27
2 Комплексное исследование экосистем Балтийско-Ладожского региона: эдафическое разнообразие, растительный покров и рельефообразующие процессы	29
2.1 Особенности строения рельефа объединенного карбонового полигона «Ладога»....	29
2.2 Растительный покров объединенного карбонового полигона «Ладога»	32
2.3 Строение кроны дерева и поверхность листьев на примере трех видов рода <i>Ulmus L.</i>	35
2.3.1 Структура кроны.....	37
2.3.2 Площадь листовой поверхности	37
2.3.3 Структурные признаки.....	38
2.3.4 Сравнение трех видов	40
2.4 Наблюдения наземных позвоночных на территории карбонового полигона «Ладога»	43
2.4.1 Орнитофауна	44
2.4.2 Земноводные и рептилии	53
2.4.3 Млекопитающие	53
2.5 Особенности строения почвенного покрова объединенного карбонового полигона «Ладога».....	58
2.5.1 Температурный режим почв объединенного карбонового полигона «Ладога»...59	59
2.5.2 Физико-химические параметры почв объединенного карбонового полигона «Ладога»	61
2.7 Прямые измерения эмиссии CO ₂ почвами карбонового полигона Ладога	82
3 Картографирование и моделирование запасов почвенного органического вещества на территории объединенного карбонового полигона «Ладога»	83
3.1 Картографирование запасов почвенного органического вещества по данным дистанционного зондирования Земли с использованием гибридного метода	83
3.2 Моделирование запасов ПОВ на основе модели ROMUL	86

3.3 Исследование потенциала секвестрации органического углерода наземными экосистемами, развивающимися в ходе экогенетических сукцессий при самозарастании нарушенных земель как моделей естественной аккумуляции углерода органических соединений в составе наземной растительности и почв	92
4 Молекулярный состав гуминовых кислот почв и оценка стабилизации ПОВ на территории карбонового полигона «Ладога»	94
5 Роль микробиома почв в углеродном цикле зональных и антропогенно-преобразованных экосистем южной тайги	101
6 Анализ концентраций, потоков и эмиссионных соотношений для углеродсодержащих газов	109
6.1 Анализ потоков СО ₂ для урбанизированных территорий пригорода Санкт-Петербурга	109
6.1.1 Анализ результатов измерений аппаратурой Eddy Covariance System на станции Pet	112
6.2 Разработка и тестирование оптимальной методики определения интегрального содержания СО ₂ в атмосфере по данным ИК наземного дистанционного зондирования	125
7 Содержание аэрозолей в атмосфере Балтийско-Ладожского региона	135
7.1 Лидарные технологии для мониторинга аэрозольных частиц в атмосфере	135
7.1.1 Аэрозольные загрязнения над г. Санкт-Петербургом в разные сезоны по результатам лидарных измерений с 2014 по 2022 год	141
7.1.2 Аэрозольное загрязнение атмосферы по данным лидарного комплекса и солнечного фотометра	146
7.1.3 Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербурге	150
7.1.4 Аэрозольное загрязнение атмосферы на примере данных лидарного зондирования в Санкт-Петербурге (Россия), Куопио (Финляндия), Минске (Беларусь)	157
7.1.5 Вертикальная изменчивость аэрозольных загрязнений в Санкт-Петербурге по данным многолетних лидарных наблюдений	165
7.1.6 Оценка аэрозольных загрязнений в Санкт-Петербурге и п. Войково по результатам синхронных лидарных измерений	170
7.1.7 Распределение аэрозольных частиц в Ленинградской области по пути направления ветра от г. Санкт-Петербурга	177
7.1.8 Алгоритм оценки пространственно-временного распределения аэрозолей на Европейском континенте по данным многолетнего лидарного зондирования	185

8 Оценка изменения параметров системы «питательная среда – зеленая водоросль – гуминовая кислота» во времени.....	186
9 Разработка методов оценки состояния здоровья экосистем по функциональному состоянию животных-биоиндикаторов	199
9.1 О возможности использования пресноводных раков в тестировании экологического состояния акваторий солоноватых вод.....	200
9.2 Методический подход к экспериментальной оценке функционального состояния («здоровья») пресноводных раков по максимальной скорости потребления кислорода	208
9.3 Оценка длительного воздействия биологически очищенных сточных вод на ракообразных: Возможность раннего выявления опасной токсичности очищенных сточных вод с помощью биоэлектронной системы непрерывного анализа кардиоактивности раков.....	211
9.3.1 Оценка качества БОСВ по характеристикам кардиоактивности десятиногих раков	212
9.3.2 Определение хронического токсического действия БОСВ на дафний	214
9.4 Оценка экологической безопасности обезвреженных озоном судовых балластных вод.....	219
9.4.1 Испытания на соленой и солоноватой воде	229
9.4.2 Испытания на пресной воде	230
10 Систематизация и сравнительная оценка институциональных механизмов климатически релевантной трансформации экономики, формирующих рамочные условия результативного участия ключевых эмитентов климатически активных газов в секвестрационных проектах	232
10.1 Институциональные режимы углеродного регулирования и оптимизация низкоуглеродных стратегий приоритетных секторов российского бизнеса.....	236
10.2 Финансовые модели углеродного регулирования: международная практика и особенности внедрения в Российской Федерации	238
11 Разработка и оптимизация бизнес-моделей углеродного земледелия на карбоновой ферме с целью дальнейшей трансляции бизнесу	240
11.1 Уточнение оценки углеродного следа аграрного сектора Северо-запада РФ в ходе реализации Стратегии развития производства органической продукции в РФ на период до 2030 года в части увеличения площади земель, отводимых для применения технологий органического земледелия.....	243
11.2 Разработка финансовых моделей инвестиционных проектов карбоновых ферм с использованием разных технологий наиболее актуальных для Северо-Западного региона и обоснование экономической эффективности реализации приоритетных природных климатических проектов	247

11.3 Разработка рекомендаций по вопросам финансирования карбоновых ферм с учетом условий и особенностей финансовой модели углеродного регулирования в Российской Федерации, актуальных для Санкт-Петербурга и Ленинградской области.....	249
12 Систематизация технологий природных климатических проектов на основе лесных, сельскохозяйственных и морских экосистем по поглощению и предотвращению эмиссии парниковых газов и их приоритизация с точки зрения целесообразности реализации в Северо-Западном регионе	252
12.1 Разработка финансовых моделей инвестиционных проектов карбоновых ферм с использованием разных технологий наиболее актуальных для Северо-западного региона и обоснование экономической эффективности реализации приоритетных природных климатических проектов	266
12.2 Рекомендации по формированию институциональных условий для целенаправленного участия предприятий сектора естественной монополии в реализации климатических проектов и переходе к низкоуглеродной модели на национальном и региональном уровнях (на примере теплоэнергетики)	277
12.2.1 Особенности структурного реформирования и регулирования энергетики в России и за рубежом	278
12.2.2 Структурные и региональные особенности развивающейся сферы климатических проектов в России	282
12.2.3 Рекомендации по интеграции задач климатической политики в процесс реформирования российской теплоэнергетики	288
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	292
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	300

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

CCUS технологии (Carbon Capture, Utilization and Storage)	- это комплекс технологий, включающий улавливание углекислого газа (Carbon Capture) из промышленных выбросов, его последующее использование (Utilization) в различных продуктах или процессах и долгосрочное захоронение (Storage)
Биоуголь (Biochar)	- это высокоуглеродистый твердый материал, получаемый путем пиролиза биомассы. При внесении в почву биоуголь способствует улучшению ее плодородия и служит для долгосрочной секвестрации углерода
Вихревые ковариации (eddy covariance)	- это микрометеорологический метод для прямого измерения потоков парниковых газов (таких как CO ₂) между экосистемой и атмосферой
Глобар	- стандартный внутренний источник света IFS 125HR для среднего ИК-диапазона спектра
Гуминовые кислоты	- это сложные органические молекулы, образующиеся в процессе разложения растительных и животных остатков в почве (гумификации). Они являются основной компонентой гумуса, играют ключевую роль в плодородии почв и секвестрации углерода
Двулетняя побеговая система	- пространственно-временная единица строения кроны дерева, которая представляет собой материнский побег и развившиеся на второй год из почек на нем боковые побеги
Дистанционное зондирование Земли	- это метод получения информации о поверхности Земли и атмосфере без прямого контакта, с помощью съемки с летательных аппаратов (самолетов, спутников). Данные ДЗЗ используются для мониторинга растительного покрова, состояния почв и оценки углеродного пула
Карбоновые полигоны	- это территория, создаваемая для проведения исследований циклов углерода в природных экосистемах. На ней ведется мониторинг, разработка и верификация методов измерения

	потоков парниковых газов, а также апробируются технологии контроля углеродного баланса
Карбоновый фарминг	- это совокупность агротехнических и управленческих практик в сельском и лесном хозяйстве, направленных на увеличение секвестрации углерода из атмосферы и его накопления в почве и биомассе
Климатические проекты	- это целенаправленная деятельность (например, лесовосстановление), результатом которой является снижение концентрации парниковых газов в атмосфере или адаптация к изменениям климата
Микробиом почв	- это совокупность всех микроорганизмов (бактерии, грибы, археи, простейшие) и их генетического материала, обитающих в почве. Он играет ключевую роль в трансформации органического вещества, круговороте питательных элементов и секвестрации углерода
Потенциально токсичные элементы	- это широкий класс химических элементов (включая тяжелые металлы, металлоиды и другие), которые при определенных концентрациях и условиях окружающей среды могут оказывать вредное воздействие на живые организмы и экосистемы
Почвенное органическое вещество	- это продукт, который аккумулируется в почве в виде неразложившихся, а также различной степени разложения органических остатков. Оно является ключевым компонентом глобального цикла углерода в атмосфере, педосфере и гидросфере
Секвестрация углерода	- это процесс изъятия углекислого газа из атмосферы и его долгосрочное хранение в природных резервуарах, таких как почва и биомасса растений
Спектр экосистемных услуг (ESS)	- это совокупность всех выгод, которые человечество получает от экосистем. К ним относятся обеспечивающие услуги (продукты, например, пища и вода), регулирующие услуги (регуляция климата, очистка воды), культурные услуги (рекреация, эстетическое наслаждение) и поддерживающие услуги (формирование почвы, фотосинтез)

- Тяжелые металлы - это группа металлов и металлоидов (например, свинец, кадмий, ртуть, мышьяк), которые часто обладают токсичностью для живых организмов даже при низких концентрациях
- Углеродные единицы (Carbon credits) - это торгуемые сертификаты, каждый из которых представляет собой право на выброс одной тонны эквивалента CO₂. Генерируются в результате реализации проектов, которые приводят к снижению выбросов или увеличению поглощения парниковых газов
- ЯМР спектроскопия - это аналитический метод, который позволяет изучать молекулярную структуру и состав веществ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

AD-Net	Asian Dust Network
AERONET	Аэрозольная роботизированная сеть
AL	Алифатические структурные фрагменты
AR	Ароматические структурные фрагменты
ASVs	Варианты последовательностей ампликонов
BI2	Brightness Index
BrO ₃ ⁻	Бромат-ион
BSS	Двулетние побеговые системы
CH ₄	Метан
CHBr ₃	Бромоформа
CO	Угарный газ
COCCON	COllaborative Carbon Column Observing Network
CRF	Cardiorespiratory fitness
DOC	Растворимый органический углерод
DOFS	Degrees of freedom for signal
EARLINET	European Aerosol Research Lidar Network
ESS	Спектра экосистемных услуг
FAO	Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН
FTIR	Fourier Tranform InfraRed
GML NOAA	Global Monitoring Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GPP	Gross Primary Production
GRVI	Green Ratio Vegetation Index
H ₂	Водород
HOBr	Гипобромная кислота
IHSS	Международное общество по изучению гуминовых веществ
InSb	Indium Antimonide
KNN	K-Nearest Neighbors
LCC	Стоимости жизненного цикла
LSWI	Land Surface Water Index
ML	Методы машинного обучения

MRV	Measurement, reporting, verification
N ₂ O	Закись азота
NDACC	Network for the Detection of Atmospheric Composition Change
NDVI	Нормализованный разностный индекс растительности
NIR	Ближний свет
NO ₂	Диоксида азота
NPV	Чистая приведенная стоимость
O ₃	Озон
OBr ⁻	Гипобромит
R ²	Коэффициент детерминации
REALM	Regional East Atmospheric Lidar Mesonet
RF	Random forest
RFE	Метод рекурсивного исключения признаков
RFOK	Random forest ordinary kriging
RH	Относительная влажность воздуха
RI	Redness Index
RMS	Root mean square
SF ₆	Гексафторид серы
SHAP	SHapley Additive exPlanations
SNR	Атмосферное отношения сигнал/шум
SVM	Метод опорных векторов
SWIR	Коротковолнового инфракрасного излучение
TC	Total column
TCCON	Total Carbon Column Observing Network
TLS	Наземное лазерное сканирование
TRO	Общий остаточный окислитель
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
VIS	Видимый свет
VMR	Volume mixing ratio
AO	Антиоксиданты
AOA	Антиоксидантная активность
AOT	Аэрозольная оптическая толщина
АФК	Активные формы кислорода
БОСВ	Биологически очищенные сточные воды

ВВП	Внутренний валовый продукт
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ГК	Гуминовые кислоты
ГСА ВМО	Глобальная служба атмосферы Всемирной метеорологической организации
ДДЗ	Дистанционное зондирование Земли
ЕТО	Единой теплоснабжающей организации
ИФ	Интегральная флуоресценция
КП	Климатический проект
КСР	Концентрация свободных радикалов
ЛВОФ	Лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф
МГСА	Малые газовые составляющие атмосферы
ОВП	Окислительно-восстановительный потенциал
ПТЭ	Потенциально токсичные элементы
РК	Регрессионный крикинг
РО	Регулируемые организации
РЦ	Ресурсный центр
CO ₂	Углекислый газ
СПбГУ	Санкт-Петербургский государственный университет
СУБВ	Системами управления балластными водами
ТМ	Тяжелые металлы
ТЭК	Топливно-энергетический комплекс
УЕ	Углеродные единицы
УФ	Ультрафиолет
ФГБУ «ГГО»	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая лаборатория»
ХЕЛКОМ	Хельсинкская комиссия
ЦМР	Цифровая модель рельефа
ЧСС	Частота сердечных сокращений
ЭПР	Электронный параметрический резонанс
ЮЗОС	Юго-Западные очистные сооружения
ЯМР	Ядерный магнитный резонанс

ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой 21 века является изменение климата – за последние 10 лет (с 2014 по 2023 гг.) средняя глобальная температура стала на 1.19 ± 0.12 °С выше значений, зарегистрированных в конце XIX века [1]. Одним из наиболее значимых факторов изменения климата является увеличение антропогенных эмиссий парниковых газов, в особенности диоксида углерода (CO_2) [1-2]. Для сокращения антропогенных выбросов и достижения углеродной нейтральности необходима достоверная количественная оценка источников и стоков парниковых газов в атмосферу [3]. При этом подчеркнем, что большие неопределенности в оценках потоков этих МГСА (малые газовые составляющие атмосферы) характерны для локального, мезо- и регионального масштабов, что часто приводит к трудностям при интерпретации наблюдающихся изменений состава атмосферы, а также существенно осложняет процесс прогнозирования эволюции климатической системы нашей планеты.

Для изучения локальных потоков парниковых газов между экосистемами и атмосферой в настоящее время активно применяется метод вихревых ковариаций (метод турбулентных пульсаций) [4-10]. Этот метод позволяет непрерывно проводить измерения потоков CO_2 для исследуемой территории, оценивать источники и стоки CO_2 , а также их суточный и годовой ход. FLUXNET (<https://fluxnet.org/>) является крупной международной сетью по измерению потоков, в которой насчитывается более 1000 станций. Она предоставляет данные как с территорий вдали от антропогенных источников, так и данные, полученные на территории пригородов и городов [9]. В России существует национальная сеть RUFLUX (<https://ruflux.net/>), в которую входят станции, расположенные, в основном, вдали от антропогенных источников и измеряющие чистый экосистемный обмен CO_2 различных экосистем на территории России [10-11]. На территории России мониторинг потоков от антропогенных объектов пока не нашел широкого распространения, однако необходимо подчеркнуть важность таких наблюдений, поскольку большая часть антропогенных выбросов в атмосферу, достигающая 70%, приходится на урбанизированные территории с высокой плотностью населения.

Обширная территория и специфика географического положения обусловливают повышенную уязвимость Российской Федерации к наблюдаемым и прогнозируемым климатическим изменениям. Влияние изменения климата на экосистемы и экономику страны характеризуется амбивалентностью, порождая комплекс потенциальных выгод и рисков. К числу наиболее значимых угроз относится деградация многолетнемерзлых пород, которая создаёт серьёзную опасность для устойчивости инфраструктуры северных регионов, способную привести к повреждению объектов транспортной системы и

капитального строительства. В то же время, ожидаемое расширение транспортной доступности арктических морских путей способно стимулировать освоение ресурсов арктического шельфа, открывая тем самым новые векторы экономического развития [12].

Климатические изменения оказывают прогрессирующее негативное влияние на социально-экономическое развитие Российской Федерации, состояние здоровья населения и стабильность экономики [13]. Темпы потепления на территории России существенно превышают среднемировые показатели, что подтверждается значительной аномалией среднегодовых температур за последние годы ($+0,87^{\circ}\text{C}$) и устойчивым климатическим трендом ($+0,49^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) [14]. Данный процесс сопровождается рядом негативных последствий, включая эмиссию климатически-активных газов (CO_2 , CH_4 , CO) и закись азота (N_2O), сокращение площади арктического морского льда, смещение фенологических дат (в частности, более раннее наступление вегетационного периода), дегляциацию на Кавказе (например, ежегодная потеря площади ледников Эльбруса составляет $1,2\text{ км}^2$) и интенсификацию деградации многолетнемёрзлых пород, повышающую риски селевых потоков и склоновых обвалов. Деградация мерзлых пород создаёт прямую угрозу целостности инфраструктурных объектов в северных регионах, в то время как смещение агроклиматических условий способно оказать дестабилизирующее воздействие на сельскохозяйственный сектор. Прогнозируется, что изменение климата приведёт к увеличению аридности в южных регионах, исторически являвшихся основной сельскохозяйственной базой, тогда как потенциал для растениеводства может сместиться в северном направлении [15]. Еще одной важной проблемой, связанной с изменением климата является доступность пресной воды. Так, таяние многолетнемёрзлых пород оказывает существенное влияние на ресурсы пресной воды. С одной стороны, данный процесс может временно увеличить водность рек за счёт высвобождения большого объема талых вод. С другой стороны, происходит дестабилизация гидрологического режима водотоков, изменение их химического и взвешенного состава, а также усиление сезонной неравномерности водообеспечения. В долгосрочной перспективе деградация мерзлоты, выступающей естественным водоупором, способна привести к истощению запасов подземных вод в арктических регионах и усилинию риска загрязнения существующих источников воды вследствие активизации криогенных процессов. Указанные трансформации имеют системные последствия для ключевых отраслей экономики, от сельского хозяйства до транспортной инфраструктуры, причём в будущем частота и интенсивность проявления климатических последствий ожидаемо возрастут [13]. Таким образом, изменение климата представляет собой масштабный вызов, требующий разработки и реализации комплексной стратегии адаптации и смягчения, связанных с ним

рисков [14].

Результаты современных климатических моделей свидетельствуют о беспрецедентном увеличении концентраций климатически-активных газов, в особенности диоксида углерода (CO_2). Согласно данным с национальных станций мониторинга, за последние годы средняя концентрация CO_2 превысила уровень 422 млн^{-1} при темпах годового прироста 3,4–3,5 млн^{-1} , что существенно превышает среднемировые значения последнего десятилетия. Аналогичная динамика наблюдается для метана (CH_4): его среднегодовая концентрация на российских арктических станциях приблизилась к величине 2020 млрд^{-1} , а на ряде из них достигла показателей, превышающих 2100 млрд^{-1} . Зафиксированный резкий рост концентраций парниковых газов является весомым подтверждением значительного антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему [14].

Повышение достоверности прогнозов климатических изменений обуславливает разработку моделей, интегрирующих сценарии динамики концентраций парниковых газов, включая углеродсодержащие соединения (CO_2 , CH_4 , CO) и закись азота (N_2O), под влиянием как антропогенных, так и природных факторов. Реализация данного подхода требует организации системы непрерывного мониторинга их атмосферных концентраций, а также комплексного исследования природных и антропогенных источников эмиссии и стоков указанных газов [16-17].

В рамках реализации цели по достижению углеродной нейтральности экономики Российской Федерации к 2060 году, сформулированной на высшем государственном уровне, возникает необходимость в использовании достоверных данных об эмиссии и секвестрации климатически активных газов. Ключевым элементом для решения этой задачи является формирование точной и верифицированной системы учёта баланса выбросов и поглощения парниковых газов, с акцентом на количественную оценку их абсорбции природными экосистемами. Методологической основой для разработки и апробации соответствующих технологий мониторинга углеродного баланса служат карбоновые полигоны, функционирующие на специально отведённых и репрезентативных территориях [12].

Санкт-Петербургский государственный университет совместно с Главной геофизической обсерваторией им. Вoeйкова при поддержке Правительства Ленинградской обл., разработал концепцию карбонового полигона «Ладога», исследования на котором будут направлены на изучение потенциала секвестрации и депонирования парниковых газов экосистемами южной тайги. Ленинградская область, наряду с Санкт-Петербургом, представляет собой один из наиболее экономически развитых регионов России с высокой

плотностью населения. Для таких регионов, являющихся промышленными центрами Российской Федерации, проведение экспериментов по разработке стратегии углеродной нейтральности России имеет первостепенное значение. Таким образом, Санкт-Петербург и Ленинградская область могут рассматриваться как объединенный экологический и климатический мегаполигон для проведения междисциплинарных исследований в области углеродной нейтральности и устойчивого развития, включая изучение процессов эмиссии и поглощения климатически активных газов, а также разработкой и созданием карбоновых ферм - нового типа секвестрационной углеродной индустрии [18].

Секвестрация и последующее депонирование углерода в почвах представляют собой ключевой механизм функционирования карбоновых ферм. Оценка запасов и идентификация наиболее эффективных с точки зрения секвестрации типов экосистем осуществляется на карбоновых полигонах [19]. Лесные и пахотные почвы Карельского перешейка, характеризующиеся относительно высоким содержанием почвенного органического вещества (ПОВ) и умеренным климатом, демонстрируют значительный потенциал к аккумуляции и долгосрочному сохранению органического углерода. Согласно полученным данным на территории карбонового полигона «Ладога» (площадь исследованного участка превышает 150 га), запасы ПОВ в слое 0-10 см варьировали в диапазоне от 1 до более чем $9 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ [20]. ПОВ играет критически важную роль в глобальном углеродном цикле, обеспечивая связывание значительных объемов углерода, которые в противном случае могли бы быть эмитированы в атмосферу в форме CO_2 .

Для анализа динамики запасов ПОВ применяются математические модели. Одной из таких моделей является ROMUL, которая используется для решения широкого круга задач, включая: оценку эффективности почвовосстановления в процессе рекультивации, моделирование аккумуляции биомассы древостоя и гумуса, анализ функционирования и прогнозирование изменений почв под лесами, а также имитацию динамики содержания органического вещества почв во времени [21-22]. Модель применима как в естественных экосистемах, так и на нарушенных территориях (залежные земли, карьерно-отвальные комплексы), выступая в качестве эффективного инструмента для анализа потенциала секвестрации углерода в различных типах экосистем, что является необходимым условием для достижения целей углеродной нейтральности Российской Федерации.

Значительное внимание в современных исследованиях уделяется роли почвенных микроорганизмов как ключевых агентов глобального углеродного цикла [23-25]. Микробные сообщества, в особенности бактерии, обеспечивают деструкцию органического вещества растительного, животного и грибного происхождения. В трансформации углерода в наземных экосистемах участвуют специфические филогенетические группы (например,

Actinobacteriota, *Proteobacteria*), формирующие функциональные группы, которые непосредственно влияют на процессы депонирования органического углерода в почве [26].

Изучение данных микробиологических процессов приобретает первостепенное значение для прогнозирования динамики глобального углеродного цикла в условиях изменяющегося климата [23, 27-28]. В этой связи, одной из критически важных задач карбоновых полигонов является получение репрезентативных данных о таксономической структуре почвенного микробиома и количественной оценке численности ключевых филогенетических групп, ответственных за процессы трансформации органического углерода.

Глубокое понимание геохимических и биогеохимических процессов в климатической системе представляет собой фундаментальную основу для построения точных прогнозов её изменений и разработки эффективных стратегий смягчения антропогенного воздействия. Интенсификация промышленного производства и автомобильного транспорта обуславливает рост эмиссии парниковых газов (CH_4 , CO_2 , N_2O , CO) и аэрозольных частиц, что приводит к нарушению естественной динамики биогеохимических циклов. В связи с этим, ключевой задачей карбонового полигона «Ладога», является организация мониторинга потоков климатически активных газов и оценка секвестрационного потенциала экосистем, характерных для Северо-Запада России. Зона исследований охватывает преимущественно территории южной и средней тайги в северной части Ленинградской области.

Ключевым показателем для оценки поглощения CO_2 экосистемой является валовая первичная продукция (Gross Primary Production (GPP)), которая количественно характеризует объем углекислого газа, ассимилированного растительностью на единице площади в процессе фотосинтеза [29-30]. Расчет значений GPP позволяет количественно оценить секвестрационный потенциал как территории Ленинградской области в целом, так и полигона «Ладога» в частности, что составляет основу для определения темпов депонирования углерода экосистемой. Полученные данные служат фундаментом для идентификации, параметризации и последующей monetизации ключевых углеродных услуг, предоставляемых референсными экосистемами региона. Реализация данной задачи создаст научную базу для разработки механизмов компенсации за сохранение и увеличение углеродного потенциала природных комплексов [31].

Несмотря на большую роль климатически-активных газов в изменении климата на планете, атмосферные аэрозоли вносят сопоставимый вклад в климатическое регулирование [32]. Их воздействие на климатическую систему реализуется через модификацию радиационного баланса планеты, влияя на температурный режим, а также

через воздействие на процессы облакообразования и формирования осадков. Климатический эффект аэрозолей определен их физико-химическими свойствами, общей концентрацией и высотным распределением в атмосфере. К числу ключевых механизмов воздействия относятся: участие в фазовых переходах воды, прямое и непрямое влияние на радиационный баланс (в особенности характерное для пылевых облаков), катализ гетерогенных химических реакций, а также функции переноса вещества и влаги [33].

Исследование состояния атмосферы в урбанизированных зонах и их окрестностях имеет критическое значение для анализа климатических изменений и идентификации опасных тенденций. Антропогенные аэрозоли, вызывая помутнение атмосферы и образование смога, одновременно участвуют в гетерогенных каталитических реакциях, способствуя удалению отдельных газообразных загрязнителей. Параллельно аэрозоли почвенного происхождения и ледяные частицы вносят вклад в процессы разрушения озонового слоя в полярных регионах [34]. Атмосферный аэрозоль оказывает комплексное воздействие на радиационный баланс, модулируя интенсивность прямой и рассеянной солнечной радиации, достигающей земной поверхности, а также опосредованно влияет на глобальный углеродный цикл. Указанные воздействия формируют обратные связи в системе "климат-углерод", оказывая дополнительное влияние на климатическую систему [35-36].

Основными источниками загрязнения атмосферы в Северо-Западном регионе Российской Федерации выступают автомобильный транспорт, промышленные предприятия и процессы сжигания топлива, которые дополняются естественными эмиссиями аэрозольных частиц [37]. Крупные промышленно-транспортные центры, такие как Санкт-Петербург, характеризуются значительными объемами выбросов, достигающих сотен тонн вредных веществ. Данное обстоятельство оказывает негативное воздействие на здоровье населения и состояние окружающей среды не только в пределах города-источника, но и на сопредельных территориях вследствие атмосферного переноса загрязняющих веществ [38].

Существенным аспектом формирования климатической повестки является учёт углеродного потенциала водных экосистем. Накопление углерода в прибрежных зонах обеспечивается деятельностью специфических биотических компонентов, таких как микроорганизмы и водная растительность [39]. Нарушение функционирования данных экосистем способно привести к значительным негативным последствиям, включая снижение скорости секвестрации атмосферного углерода и дестабилизацию созданных ими пуллов углерода.

В данном контексте биологические инвазии чужеродных видов рассматриваются как

одна из ключевых глобальных угроз биоразнообразию, наряду с чрезмерной эксплуатацией морских биоресурсов, загрязнением морской среды из наземных источников, а также прямым разрушением или трансформацией морских экосистем. Наблюдения последних десятилетий свидетельствуют об интенсификации процессов вселения видов-интродуцентов, что происходит на фоне совокупного воздействия антропогенных и климатических факторов [40-41]. Инвазии чужеродных видов признаны одной из ведущих причин утраты биологического разнообразия и глубокой трансформации природной среды. Их действие оказывает серьёзное влияние на предоставление экосистемных услуг и благополучие человека, а также потенциально способно провоцировать дополнительные эмиссии парниковых газов из водных экосистем.

Российская Федерация продолжает участие в решении проблем глобальных климатических изменений, что закреплено в климатической доктрине РФ, подтверждающей цель достижения углеродной нейтральности к 2060 году [12]. Стратегия социально-экономического развития предусматривает сокращение нетто-выбросов парниковых газов более чем на 60% к 2050 году (со 1584 до 630 млн т СО₂-экв.) с одновременным увеличением объёмов поглощения углерода более чем в два раза (до 1200 млн т СО₂-экв.) преимущественно за счёт реализации лесохозяйственных и агроклиматических проектов [42]. При этом планируемое снижение прямых выбросов к 2050 году составляет лишь 13,6% от уровня 2019 года [43-45].

Научное сообщество разрабатывает сценарии низкоуглеродного развития, уделяя особое внимание энергетическому сектору, который вместе с транспортом формирует свыше 75% общих объёмов эмиссии парниковых газов. Усложнение климатической ситуации и ограниченная эффективность традиционных подходов стимулируют пересмотр инструментов климатической политики и энергетического перехода на глобальном и национальном уровнях, что наблюдается как в развитых, так и в развивающихся странах [46].

Несмотря на внешнеполитические вызовы, климатическая повестка сохраняет свою актуальность в контексте наблюдаемых изменений климата [47]. Российская Федерация подтверждает целевые показатели углеродной нейтральности и реализует соответствующую стратегию развития, где декарбонизация рассматривается как фактор структурной перестройки экономики и усиления инновационного потенциала.

Проведённые исследования российской теплоэнергетической отрасли идентифицируют системные барьеры, препятствующие её переходу к устойчивому низкоуглеродному развитию. На долю данного сектора, обладающего критической социально-экономической значимостью, приходится порядка половины национальных

выбросов парниковых газов. Несмотря на то, что модернизация энергетики представляет собой ключевой фактор декарбонизации, достижение целей углеродной нейтральности невозможно без структурных преобразований в экономике в целом [48-49].

Анализ данных последнего десятилетия свидетельствует о стагнации в энергоэффективности отрасли, несмотря на реализуемые меры. Основной причиной данной тенденции является высокий уровень износа генерирующего оборудования, что приводит к значительным потерям энергии и росту удельного расхода топлива [50]. Сохранение этой негативной динамики создаст прямые препятствия для выполнения целевых показателей в области энергосбережения и энергоэффективности, а также замедлит процесс снижения углеродоёмкости национальной экономики. В связи с этим, разработка комплексных решений для преодоления указанных проблем должна быть определена в качестве одного из стратегических приоритетов.

В качестве одного из потенциальных решений сложившейся ситуации рассматривается внедрение системы углеродного регулирования, включая применение рыночных механизмов [51]. Эффективность углеродных рынков остается дискуссионной: эмпирические исследования демонстрируют, что лишь около 4% подобных инициатив приводят к значимому сокращению выбросов, при этом рыночные инструменты показывают более высокую результативность в развитых странах. Для экономик развивающихся стран, а также для сектора малого и среднего предпринимательства, более действенными могут оказаться меры прямого регулирования и целевые субсидии.

Несмотря на это, Российская Федерация в своей климатической политике делает акцент на рыночные механизмы, что обуславливает необходимость тщательной оценки потенциала национального углеродного рынка с учётом структурных, экономических и региональных особенностей страны.

Таким образом, целью междисциплинарных исследований в рамках данного проекта является оценка секвестрационного углеродного потенциала бореальных южно-таежных экосистем с последующей возможностью уточнения углеродного следа и параметризованной оценки соответствующих экосистемных услуг, на примере Балтийско-Ладожского региона.

В рамках достижения цели междисциплинарных исследований были поставлены следующие задачи:

- 1) Пространственное планирование мониторинговых площадок в рамках проектирования карбонового полигона «Ладога». Включая разработку концепции их дальнейшего функционирования;

2) Исследование природных и антропогенно-нарушенных экосистем Балтийско-Ладожского региона. А именно, изучение эдафического разнообразия, растительности, рельефа местности, морфологии и физико-химических свойств почв при помощи классических и современных методов;

3) Оценка запасов углерода органических соединений в почвах карбонового полигона «Ладога» на различных уровнях организации (профильном и пространственном). Картирование и моделирование запасов углерода органических соединений в поверхностном слое почвы с использованием различных методов пространственной интерполяции данных с применением данных дистанционного зондирования Земли;

4) Исследование органического вещества зональных торфяных и альфегумусовых почв с помощью методов ядерного магнитного резонанса и оценка степени стабилизации органического вещества для изученных почв;

5) Первичное скрининговое исследование микробиологического разнообразия зональных альфегумусовых и торфяных почв методами высокопроизводительного секвенирования;

6) Исследование концентраций, потоков и эмиссионных соотношений для углеродсодержащих газов на станции атмосферного мониторинга СПбГУ (Петергоф), а также измерение потоков углеродсодержащих газов с поверхности почвы на территории карбонового полигона «Ладога»;

7) Изучение содержания аэрозолей в атмосфере Балтийско-Ладожского региона с помощью стационарных и мобильных лидарных комплексов;

8) Измерение параметров системы «питательная среда – зеленая водоросль – гуминовая кислота» в рамках работ мониторингу «голубого» углерода водных экосистем;

9) Разработка методов оценки степени антропогенной нагрузки на водные экосистемы по функциональному состоянию животных-биоиндикаторов;

10) Систематизация, характеристика и сравнительная оценка механизмов и инструментов углеродного регулирования, применяемых в международной практике, в том числе в части формирования институциональных рамочных условий, стимулирующих участие ключевых эмитентов климатически активных газов в секвестрационных проектах;

11) Выработка предложений по оптимизации низкоуглеродных стратегий приоритетных секторов российского бизнеса с учетом мониторинга и измерений потоков климатически активных газов на базе карбонового полигона «Ладога»

12) Систематизация, характеристика и сравнительная оценка инструментов и финансовых моделей углеродного регулирования, применяемых в международной практике; разработка методики обоснования финансовых решений по вопросам

инструментального, институционального, инфраструктурного обеспечения регионального углеродного рынка.

Промежуточные отчеты по НИР:

1. От карбонового полигона к углеродному регулированию: потенциал и пути развития секвестрационной углеродной индустрии на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга (GZ MDF 2023 - 1) (промежуточный); рег. № 224020100049-2;

2. От карбонового полигона к углеродному регулированию: потенциал и пути развития секвестрационной углеродной индустрии на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга (промежуточный, этап 2); рег. № 225020206644-1.

1 Проект карбонового полигона «Ладога»: принципы пространственного размещения мониторинговых площадок и концепция их функционирования

1.1 Концепт объединенного карбонового полигона «Ладога»

На территории Ленинградской области инициирован долгосрочный проект по созданию объединенного карбонового полигона «Ладога», обладающий приоритетным значением для обеспечения климатической и экологической безопасности региона. Проект разработан консорциумом в составе Санкт-Петербургского государственного университета и ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория» при содействии Правительства Ленинградской области.

Ключевой целью проекта является проведение комплексных исследований и количественная оценка секвестрационного потенциала экосистем Ленинградской области в соответствии с международными стандартами. Полученные данные создают методологическую основу для верификации углеродного следа промышленных предприятий. Реализация данной задачи направлена на минимизацию финансовых рисков, связанных с введением трансграничного углеродного регулирования, а также на выполнение обязательств регулируемых организаций в соответствии с ФЗ № 296, предоставляя альтернативу реализации более затратных климатических проектов.

Структура объединенного карбонового полигона «Ладога»

1. Стационарный полигон расположен на территории ФГБУ «ГГО» в Ленинградской области, п. Воейково. Здесь расположена наблюдательная вышка для мониторинга климатически-активных газов. Территория планируемого полигона представлена на Рисунке 1.

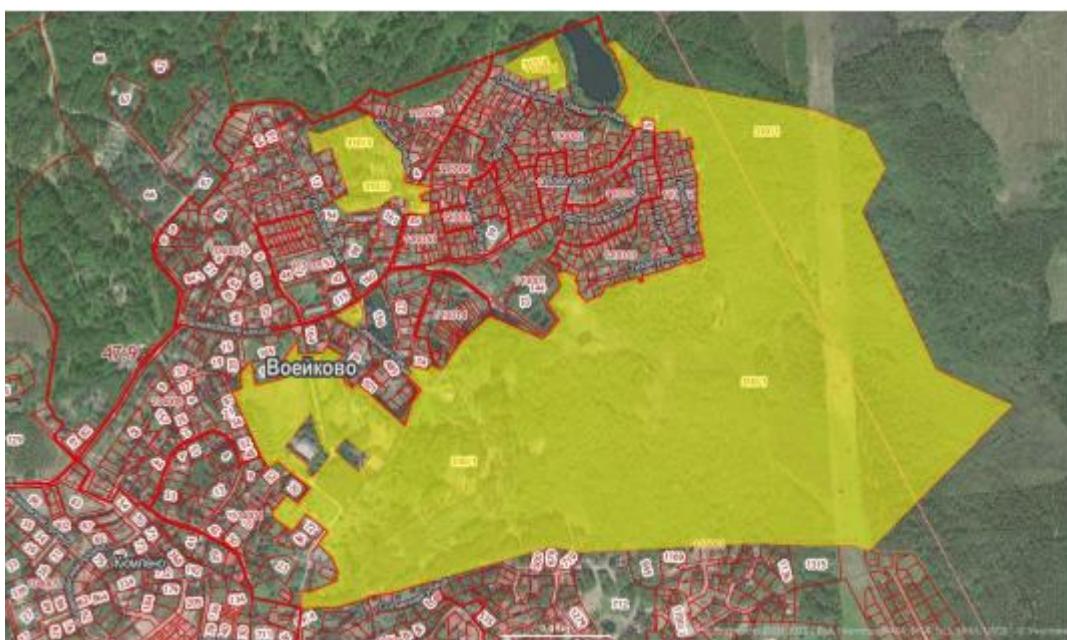


Рисунок 1 – Предполагаемое местоположение стационарного полигона в Воейково (Ленинградская область) выделено желтым цветом (<https://freestrmap.ru/>)

2. Мобильный полигон – для осуществления краткосрочных мониторинговых работ по изучению естественных и антропогенных (в том числе природоподобных) источников и стоков парниковых газов.

3. действующие станции атмосферного мониторинга ФГБУ «ГГО» и СПбГУ, входящие в международные измерительные сети ГСА ВМО (Глобальная служба атмосферы Всемирной метеорологической организации) и NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change).

4. российский центр обеспечения сопоставимости и калибровки для расширяющейся сети станций и полигонов – на базе действующих станций атмосферного мониторинга СПбГУ и ФГБУ «ГГО» (п. Воейково и г. Петергоф).

Проект учитывает лучшие мировые практики сетей ICOS [52] и AmeriFlux [53] по организации подобного рода научной инфраструктуры и наблюдательных станций.

На планируемом участке карбонового полигона проводятся постоянные мониторинговые работы по измерению климатически-активных газов и оценке состояния атмосферы с 1950х годов, что делает данную территорию уникальной с точки зрения изучения динамики содержания климатически-активных газов в воздушной среде.

Успешная реализация проекта объединенного карбонового полигона «Ладога» создает предпосылки для следующего этапа развития, а именно, организации карбоновой фермы. На ее территории будет осуществляться интенсивная секвестрация климатически-активных газов, результатом которой станет генерация верифицированных углеродных единиц.

Ключевым преимуществом территориальной интеграции карбонового полигона и фермы является формирование сквозного инновационного цикла компетенций, обеспечивающего ускоренную имплементацию результатов фундаментальных и прикладных научных исследований в коммерчески реализуемые продукты и технологии.

В рамках реализации второго этапа проекта основным получателем доходов от карбоновой фермы, как предприятия нового типа в формирующемся секвестрационной углеродной индустрии, становится инвестор проекта. Дополнительные финансовые выгоды будут получены за счет внедрения более точных систем учета выбросов парниковых газов, что повысит эффективность управления углеродным следом и снизит риски углеродного регулирования.

Формирование сети карбоновых полигонов и ферм на территории Российской Федерации способствует становлению и развитию системы углеродного земледелия (Carbon Farming), которая представляет собой перспективную экологически-ориентированную бизнес-модель. Данная модель основана на получении экономической выгоды от внедрения усовершенствованных методов управления земельными ресурсами, направленных на увеличение депонирования углерода в биомассе, органическом веществе и почвах. Достижение целевых показателей обеспечивается за счет интенсификации процессов секвестрации углерода и сокращения эмиссии климатически-активных газов в атмосферу при соблюдении экологических принципов, способствующих сохранению биоразнообразия и устойчивому использованию природного капитала.

В комплексе с промышленными технологиями улавливания и хранения углерода, углеродное земледелие формирует необходимые условия для перехода к сбалансированным углеродным циклам и достижения долгосрочной цели углеродной нейтральности.

2 Комплексное исследование экосистем Балтийско-Ладожского региона: эдафическое разнообразие, растительный покров и рельефообразующие процессы

2.1 Особенности строения рельефа объединенного карбонового полигона «Ладога»

Проектируемый карбоновый полигон «Ладога» расположен в пределах Колтушской возвышенности, занимающей южную часть Всеволожского района Ленинградской области. В системе почвенно-географического районирования территории исследования относится к южному сектору Выборгско-Приозерского округа подзолисто-альфегумусовых примитивных песчаных почв. Преобладающими типами почвенного покрова являются подбуры и слаборазвитые подзолы.

Исследование эдафического разнообразия было проведено на всей территории карбонового полигона «Ладога», включая камовые возвышенности и прилегающие заболоченные низины. Для характеристики пространственной изменчивости почвообразовательных процессов было заложено 15 полнопрофильных почвенных разрезов и выполнено 46 почвенных прикопов (Рисунок 2). Данная схема опробования обеспечивает репрезентативное покрытие основных типов ландшафтов и позволяет выявить закономерности пространственного распределения почвенных таксонов на территории полигона.



Рисунок 2 – Места отбора образцов почв на территории карбонового полигона «Ладога»

Территория исследований характеризуется камовым водно-ледниковым типом рельефа. Центральная часть возвышенности представляет собой холмистое камовое плато, тогда как периферийные участки образуют ступенчатый абрационный уступ, подверженный активной рекреационной нагрузке (в частности, развитию горнолыжной инфраструктуры). На границе возвышенности рельеф трансформируется в систему заболоченных песчаных террас и равнин. Почвообразующие породы представлены – камовыми слоистыми среднезенистыми супесями и песками с включениями тонких прослоек легкосуглинистого материала, а также флювиогляциальными (озовыми) перемытыми песками и супесями.

Гидрологический режим территории отличается значительной пространственной неоднородностью: камовые ландшафты характеризуются хорошим дренажем (за исключением термокарстовых озёрных котловин), при этом на крутых склонах в летний период наблюдается дефицит почвенной влаги, который может резко сменяться её избытком на расстоянии 50-100 метров. Равнинные периферийные ландшафты заболочены по эвтрофному типу и частично подвергались мелиоративным работам в течение XX века.

Для анализа рельефа территории карбонового полигона «Ладога» была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 30 метров на основе данных радиолокационной топографической съемки SRTM (Рисунок 3). Как следует из анализа ЦМР, наблюдается четкая ландшафтная дифференциация: северо-западная часть

занимает камовые гряды и холмы, тогда как большая часть территории относится к равнинным заболоченным ландшафтам.

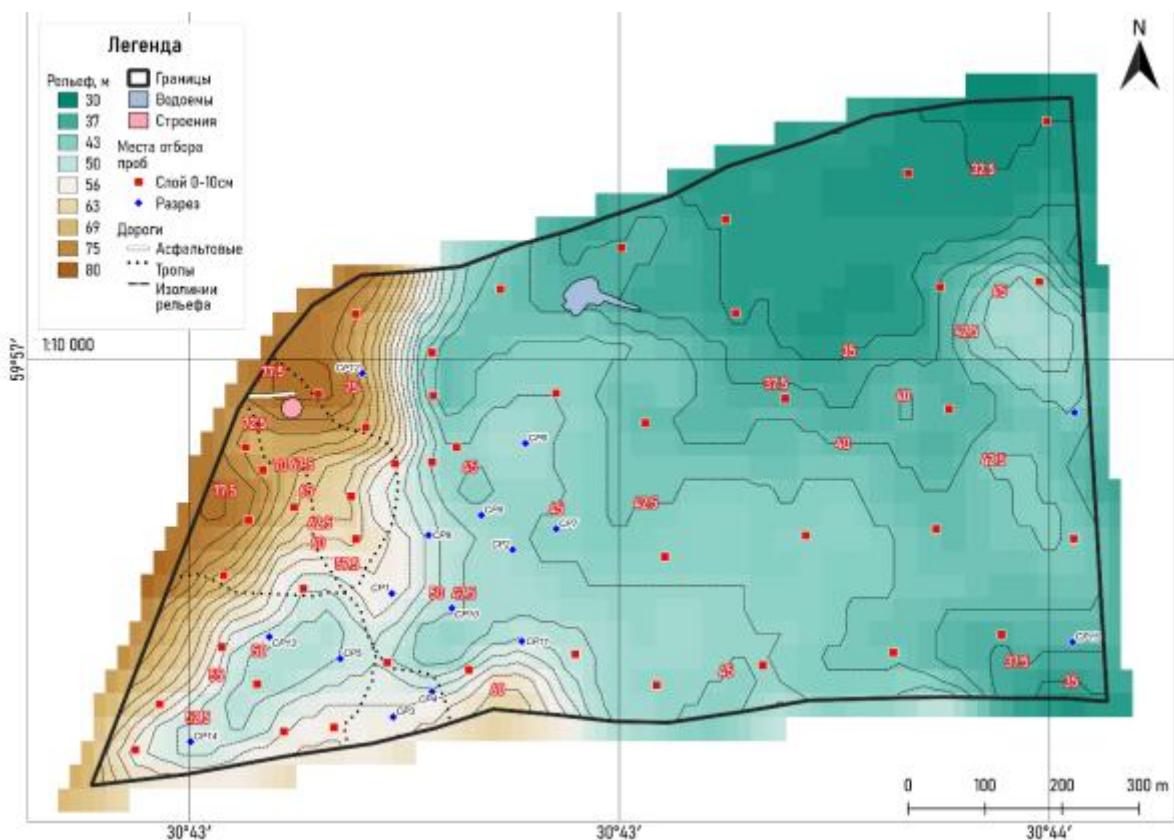


Рисунок 3 – Карта-схема рельефа карбонового полигона «Ладога» (построенного по данным SRTM) и мест отбора проб

Анализ высотной характеристики территории показывает значительный перепад абсолютных высот — от 32,5 до 77,5 метров над уровнем моря. В восточной части полигона идентифицирован изолированный холм с абсолютными отметками 42,5-45 метров. Здание обсерватории ГГО им. Воейкова, являющееся одной из ключевых инфраструктурных точек полигона, расположено на высоте 75 метров над уровнем моря, что соответствует одной из максимальных отметок территории.

Анализ пространственного распределения высотных отметок демонстрирует доминирование на территории карбонового полигона ландшафтов с абсолютными высотами до 46 метров над уровнем моря. Данные участки представлены преимущественно гидроморфными комплексами низинных эвтрофных болот. Камовые формы рельефа (гряды и возвышенности) занимают существенно меньшую площадь, формируя аккумулятивные положительные формы рельефа. Пологие камовые склоны и ровные участки рельефа в межкамовых понижениях ранее использовались в сельском хозяйстве.

Особый интерес представляет идентифицированный участок с относительным выравниванием рельефа, расположенный в межкамовой депрессии с абсолютными отметками 50-52,5 метра. Данная территория представляет собой переходную зону между доминирующими болотными массивами и камовыми возвышенностями.

2.2 Растительный покров объединенного карбонового полигона «Ладога»

Территория исследований расположена в пределах зоны южной тайги. Лесные массивы представлены преимущественно вторичными формациями, сформировавшимися в результате антропогенных воздействий (постагрекенные и послерубочные сообщества). Для древостоя характерна осветлённо-опушечная структура со включениями неморальных и синантропных видов. Климат умеренный, с частой сменой морских и континентальных воздушных масс. Среднегодовая температура – +4 °С, годовое количество осадков составляет 550-800 мм, количество дней с осадками более 50%, мощность снежного покрова свыше 50 см. Положительный баланс увлажнения обуславливает промывной тип водного режима что способствует развитию подзолообразовательного процесса на породах легкого гранулометрического состава и формированию заболоченных участков в понижениях рельефа.

Вершины камовых возвышенностей заняты березово-сосняками рябиново-ланьшевыми (Рисунок 4).



Рисунок 4 – Березово-сосняк рябиново-ланьшевый на камовой возвышенности

Формула древостоя 5Б5С. Сосны имеют диаметр от 14 см до 58 см. Высота деревьев – 20-21 м. Березы имеют диаметр 32-61 см. Высота стволов также 18-20 м. Сомкнутость полога – 0.7. Возобновление пород наблюдается преимущественно дубовое, что свидетельствует о неморализации флоры. Дубов отмечено: 15 шт в размерном классе 0.5-1.0 м и 1 шт в размерном классе до 0.5 м и 1 шт. высотой 1.8 м. Подлесок хорошо выражен, преимущественно рябиновый. Высота рябин составила в среднем 2.5-3.5 м. В составе

подлеска отмечена 1 шт. черемухи *Padus avium* (1.4 м) и 1 шт. крушины *Frangula alnus* (1.30 м высоты). Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составило 90%. Доминирует ландыш майский *Convallaria majalis*. Все остальные виды имеют существенно меньшее покрытие: *Melampyrum pretense* – 5 %, *Avenella flexuosa* -3 %, *Veronica officinalis* – 2 %, *Galium boreale* – 1 %, *Calamagrostis epigeios* -1 %, *Rubus saxatilis* 1%, *Agrostis tenuis*- 1 % С покрытием менее 1 % отмечен целый ряд лугово-опушечных и лесных видов: *Knautia arvensis*, *Hieracium umbellatum*, *Festuca ovina*, *Melica nutans*, *Campanula patula*, *Melampyrum nemorosum*, *Dactylis glomerata*, *Galium mollugo*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium myrtillus*, *Solidago virgaurea*, *Pteridium pinetorum*.

На территории залежных полей и других постагренических территориях растительность представлена залежными папоротнико-злаково-рудерально-травяными лугами, которые окружены вторичными мелколиственными лесами (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Залежные папоротнико-злаково-рудерально-травяные луга

Растительность неравномерная, много видов сорно-рудеральной и сорно-луговой групп. Встречается инвазивный вид *Solidago canadensis*. Данная растительность сочетается с синузиями папоротников *Athyrium filix-femina* и *Dryopteris carthusiana*. Общее проективное покрытие растительности на участке - 100%. Высота травостоя значительная - до 1.4-1.6 м (с учетом генеративных органов), основная высота вегетативной массы – 0,6-0,8 м. Наиболее массово представлены: *Dactylis glomerata* – 17%, *Athyrium filix-femina* – 15%, а также ряд других видов – *Calamagrostis epigeios* – 12%, *Dryopteris carthusiana* – 10% и *Solidago canadensis* – 15%. Довольно обильны: *Urtica dioica* – 7%, *Chamaenerion angustifolium* – 5%, *Vicia cracca* – 5%. С небольшим покрытием присутствуют – *Vicia sepium* – 3%, *Agrostis tenuis* – 3% и *Artemisia vulgaris* – 1%. С покрытием менее 1 % отмечены – *Scrophularia nodosa*, *Lathyrus pratensis*, *Bunias orientalis*.

Вторичные мелколиственные леса, также произрастающие на постагрогенных почвах заняты злаковыми березняками (Рисунок 6). Формула древостоя – 10 С. Общая сомкнутость крон -0,8-0,85, высота деревьев – 18-21 м, диаметр стволов – 17-27 см. Подрост редкий, отмечены: *Acer platanoides* – 0,5-3,5 м; *Populus tremula* - 2м., *Pinus sylvestris* – 0,5 м., *Quercus robur* – 0, 8 м. Подлесок разнообразен видами, но достаточно редкий. В ярусе кустарников отмечены: *Padus avium*, *Corylus avellana*, *Salix caprea*, *Viburnum opulus*, *Alnus incana*, *Sorbus aucuparia* и натурализовавшийся культивар - *Swida sericia*. Проективное покрытие травяного яруса: 40-45%, он представлен следующими видами: *Calamagrostis canescens* - 10%, *Agrostis tenuis* - 15%, *Dactylis glomerata* - 7%, *Poa pratensis* - 3%, *Veronica chamaedrys* - 1%, *Calamagrostis arundinacea* -1%, *Rubus saxatilis* - <1%, *Moehringia trinervia* - <1%, *Solidago virgaurea* – <1%, *Geranium palustre* – <1%, *Convallaria majalis* - 1%, *Stellaria media* - <1%, *Galium mollugo* - 1%, *Geum urbanum* - <1%, *Vicia sepium* - <1%, *Chamaenerion angustifolium* - 1%, *Melampyrum pretense* - <1%, мхи редкие, покрытие не более 3-5%, отмечены: *Pleurozium schreberi*.



Рисунок 6 – Березняк злаковый

Гидроморфные и полугидроморфные низинные позиции рельефа заняты ивовыми влажнотравными березняками и низинными рогозово-влажнотравными болотами (Рисунок 7). Формула древостоя – 10Б, высота деревьев – 12-14 м, при диаметре стволов – 22-25 см. Возобновление древостоя редкое. Отмечены: *Alnus glutinosa* – 2,5 м; *Acer platanoides* – 2,3 м; *Quercus robur* – 1,6 м. Подлесок – средней густоты. В ярусе кустарников встречаются: *Frangula alnus*, *Salix aurita*, *Salix cinerea*, *Viburnum opulus*. Средняя высота яруса кустарников - 2,0-3,5 м. Травостой высокий – до 1,5 -1,6 м и довольно густой – проективное покрытие яруса трав – 75-80%. В травяном ярусе сопоставляют: *Lysimachia vulgaris* -12%, *Filipendula ulmaria* – 20%, *Equisetum palustre* – 15%. Довольно обильны: *Viola palustris* – 15%, *Geum rivale* – 3%, *Deschampsia cespitosa* – 10%, *Equisetum sylvaticum* – 5%. Остальные

виды – малообильны: *Comarum palustre* -<1%, *Cirsium palustre* - <1%, *Crepis paludosa* -<1%, *Luzula pilosa* - <1%, *Galium palustre* -1%, *Scirpus sylvaticus* -2%, *Potentilla erecta* -<1%, *Ranunculus acris* - <1%.



Рисунок 7 – Березняк ивовый влажнотравный

На низинных болотах растительность очень плотная, общее проективное покрытие – 100%. Высота травостоя – 1,6 -1.8 м. В покрове сопоставляют: *Turpha latifolia* – 15%, *Filipendula ulmaria* 40%, *Lysimachia vulgaris* 20%, *Equisetum palustre* – 12%, *Scirpus sylvaticus* – 7%. Покрытие прочих видов не превышает 1-2 %: *Elytrigia repens*, *Impatiens perviflora*, *Crepis paludosa*, *Impatiens glandulifera*, *Geum rivale*. Мхи –редки, отмечен *Brachythecium sp.*

Растительность на Колтушских высотах является антропогенно-измененной, что выражается, также в очень высокой пространственной неоднородности распределения растительных сообществ. Это связано с мелкоконтурностью землепользования в южной части Карельского перешейка [54]. Сосновые леса на камовых возвышенностях Карельского перешейка иногда рассматривается как экстразональное явление [55]. По данным О.Г. Чертова [56] на песках разного генезиса сильнодренированных равнин и склонов разной крутизны Карельского перешейка доминируют сосняки, а реже ельники вересковые, брусничные и чернично-брусничные зеленомошные, что хорошо согласуется с полученными нами результатами.

2.3 Строение кроны дерева и поверхность листьев на примере трех видов рода *Ulmus L.*

Точная количественная оценка надземной биомассы является ключевой для оценки запасов углерода и понимания полного спектра экосистемных услуг (ESS), предоставляемых древесными растениями [57-59]. Листовая поверхность кроны дерева определяет его существование, как продуцента, и ее изучение важно для понимания растительного организма как целостной динамичной системы [60-61]. Листовая поверхность растения имеет уникальные структурные особенности, основанные на геометрических конструкциях, изменяющихся во времени [62-64]. Размер и форма

листовой пластиинки связаны с пространственной структурой кроны, однако свойства этой связи во многом еще не раскрыты [65]. Современные подходы к решению прогностических задач при исследовании древесных растений требуют дальнейшего уточнения качественных функциональных признаков для исследования площади листовой поверхности [58,60,66,67]. Широко используемый сейчас метод исследования структуры дерева при помощи наземного лазерного сканирования (TLS) сталкивается с ограничениями в анализе взрослых деревьев с большим диаметром кроны [68]. Использование даже таких простых структурных характеристик дерева, как диаметра ствола, диаметр кроны, высота дерева, позволяет увеличить точность расчета биомассы ствола и отдельных ветвей. Однако методы требуют дальнейшей доработки [58].

При характеристике продукционного потенциала лесных экосистем важна работа по выявлению сопряженных систем признаков для различных древесных пород [66,69,70]. Объяснение строения организма или органа может быть осуществлено с разных точек зрения: экологической, физиологической, конструктивно-морфологической, и исторической. Все они правомерны и необходимы, ни одна не имеет права на единоличное превосходство [71]. Для комплексного исследования структуры кроновых систем различных древесных растений необходимо совмещение знаний о пространственно-временной структуре кроны с размерными и плоскостными характеристиками листовых пластиинок, а также разработка методологических подходов к анализу биомассы кроны дерева с учетом ее динамических пространственно-временных свойств. Цель данного исследования, выделить комплекс структурных признаков побеговых систем кроны широколиственного дерева умеренной зоны, определяющих особенности расположения листовой поверхности.

В работе использованы побеговые комплексы крон трех видов рода *Ulmus L.*: *Ulmus glabra Huds.*, *Ulmus campestris L.* и *Ulmus parvifolia Jacq.*. Названия видов приведены в соответствии с системой, разработанной монографом семейства Ulmaceae И.А. Грудзинской [72].

Материал собирался с 2018 по 2023 год. Исследовались кроны деревьев семенного происхождения в виргинильном (v) и раннем генеративном (g1) онтогенетических состояниях и их отдельные ветви. *U. glabra* исследован в Ленинградской, Белгородской и Воронежской областях в условиях естественного произрастания широколиственных лесных сообществ. Материал для *U. campestris* собирался в естественных сообществах Краснодарского края и республики Абхазия. *U. parvifolia* исследован в интродукции на территории Абхазской научной лесной опытной станции (город Очамчира, республика Абхазия).

Для видов характерны симподиальное нарастание, плахиотропный рост, очередное листорасположение, акротонное расположение побегов. Листья у исследованных видов неравнобокие у основания, по краю двояко-, троякозубчатые, реже – цельнокрайние, с перистым жилкованием [72,73].

2.3.1 Структура кроны

Структура кроны дерева анализировались с учетом свойств мульти масштабности и иерархичности побеговых систем [74-76]. Согласно этим представлениям, крона дерева – модульная пространственно-временная иерархическая система, состоящая из следующих уровней организации: 1) метамер; 2) элементарный побег; 3) двулетняя побеговая система; 4) эпизон; 5) ветвь от ствола; 6) крона; 6) система крон многоствольного дерева. Выделение морфофункциональных типов двулетних побеговых систем (BSS) производилось по методике, разработанной в Санкт-Петербургском государственном университете И.С. Антоновой с соавторами [64,77,78]. Согласно этой методике, при выделении морфофункциональных типов BSS древесных растений умеренной зоны учитываются следующие группы признаков: 1) время заложения и разворачивания почек, периодичность роста побегов, составляющих BSS; 2) тип нарастания и листорасположения материнского и боковых побегов BSS; 3) длина, количество листьев и диаметр материнского и боковых побегов; 4) соотношения длины материнского побега и боковых побегов в различных положениях на нем; 5) углы отхождения боковых побегов; 6) длительность жизни BSS в составе более крупных побеговых комплексов. Выделены следующие морфофункциональные типы двулетних побеговых систем: «Сверхростовая», «Ростовая», «Основная», «Узкоконтурная», «Заполняющая», «Вертолет» [78,79].

Несмотря на симподиальный способ нарастания, характерный для представителей рода *Ulmus*, оси различных порядков ветвления в составе побеговых комплексов складываются из побегов, продолжающих ранее выбранное направление. В связи с этим принято рассматривать такую ось, как ось одного порядка ветвления, несмотря на регулярные перевершинивания при отмирании апикальной почки [80].

2.3.2 Площадь листовой поверхности

Исследовались листовая поверхность периферических двулетних побеговых систем, имеющих олиственные боковые побеги. Отдельно анализировалась суммарная площадь листовой поверхности побегов в составе 2ПС. В качестве площади листовой поверхности рассматривается площадь проекции листовой пластинки (одной стороны листа) на плоскость, выраженная в квадратных сантиметрах. Листовые пластинки каждого побега в полевых условиях выкладывались на плоскость, фотографировались с масштабом, затем в камеральных условиях измерялись при помощи программы ImageJ. Учитывались признаки

положения каждого зеленого листа на побеге, для нахождения суммарной площади листовой поверхности побега площади всех листьев суммировались.

2.3.3 Структурные признаки

Двулетняя побеговая система – пространственно-временная единица строения кроны дерева, которая представляет собой материнский побег и развившиеся на второй год из почек на нем боковые побеги. Выделение двулетних побеговых систем опирается на основополагающие пространственные (морфологические) и временные свойства побега, характерные для вида. При этом в структуре BSS раскрывается свойство зональности материнского побега [64,78,81].

Выделены морфофункциональные типы двулетних побеговых систем у всех трех исследуемых видов (Рисунок 8). Более 85% листовой поверхности у всех исследуемых видов находится на коротких и малолистных «Заполняющих» BSS в силу их многочисленности в кроне. Побеговые системы других типов создают каркас ветвей в кроне.

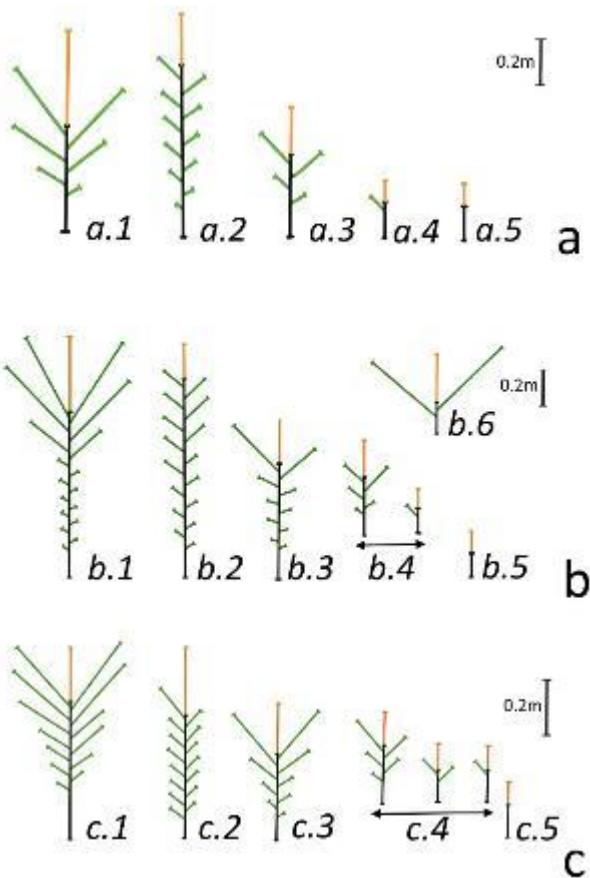


Рисунок 8 – Схемы геометрического контура выделенных для трех видов морфофункциональных типов двулетних побеговых систем

a – *U. glabra*, b – *U. campestris*, c – *U. parvifolia*; 1 – «Ростовая», 2 – «Узкоконтурная», 3 – «Основная», 4 – ветвящиеся «Заполняющие» (з1), 5 – неветвящаяся «Заполняющая»; 6 –

«Вертолет»; зеленым цветом отмечены боковые побеги второго года, оранжевым – осевые побеги, черным – материнские побеги

Для характеристики 2ПС с точки зрения их положения в составе многолетних побеговых комплексов разного уровня использовались специально выделенные структурные признаки, характеризующие материнский побег 2ПС: 1) положение материнского побега на побеге предыдущего года; 2) положение многолетней оси, к которой относится материнский побег 2ПС, на инициальном побеге предыдущего порядка ветвления; 3) возраст материнского побега в составе оси (шаг); 4) порядок ветвления оси, к которой относится побег, в составе ветви от ствола; 5) положение ветви на стволе в кроне дерева (три градации – верхняя, средняя и нижняя часть кроны).

Подсчет положения материнского побега 2ПС на побеге предыдущего года (Loc) производился от верхнего осевого побега на материнском к самому нижнему боковому побегу (Рисунок 9а). Этот признак характеризует зональность материнского побега инициальной 2ПС трехлетнего эпсиона (динамического побегового комплекса).

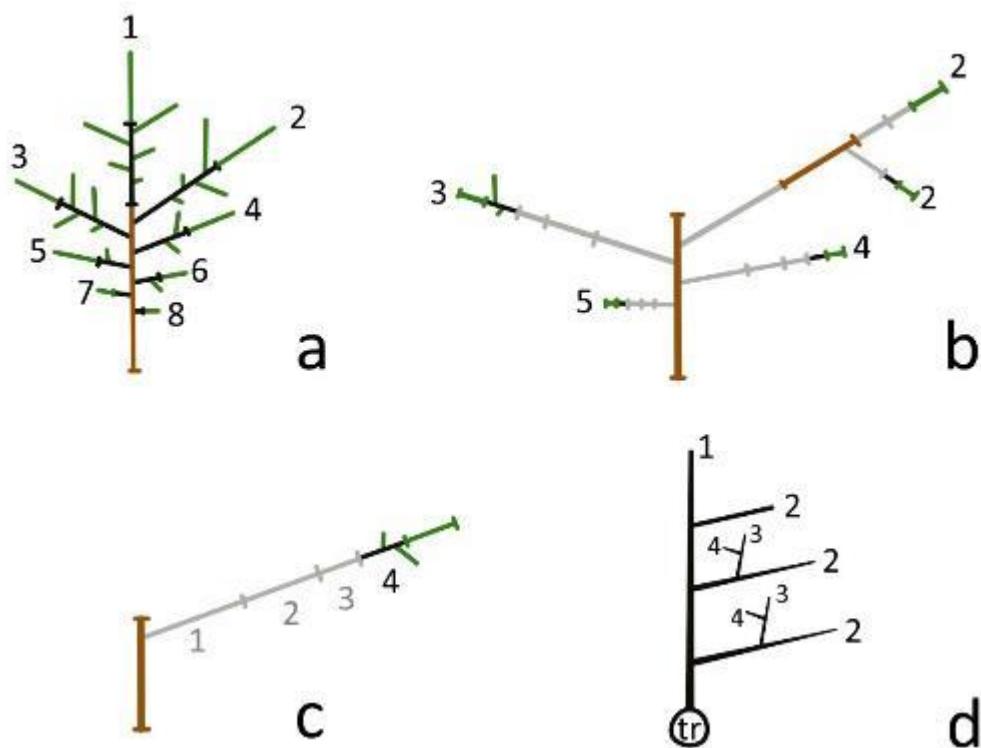


Рисунок 9 – Принципы присвоения значений для структурных признаков, характеризующих двулетние побеговые системы побеги в составе побеговых комплексов
 а – положение побега на материнском побеге предыдущего года; б – положение материнского побега 2ПС в составе оси; в – шаг; г – порядок ветвления оси; цифрами отмечены значения каждого из признаков для выделенных 2ПС; черным цветом отмечены

материнские побеги 2ПС; коричневый цвет – материнские побеги или оси, относительно которых ведется отсчет; зеленый – олиственные побеги в составе 2ПС; ст – ствол

Положение материнского побега 2ПС в составе оси (LocAx) относится к признакам, характеризующим многолетние свойства осей в составе эпиона. Нумерация значений положения оси проводилась по тому же принципу, что и признак Loc (Рисунок 9б), отличие признаков состоит во временной составляющей – после образования боковой побег на материнском дает начало оси, в составе которой на следующий год образуется новый осевой побег, продолжающий ось вплоть до ее отмирания.

Признак возраста материнского побега 2ПС в составе оси, или шага материнского побега в составе оси (St), характеризует время жизни оси от ее образования до конкретного вегетационного сезона, в который был сформирован материнский побег исследуемой 2ПС (Рисунок 9с).

Признак порядка ветвления оси в составе эпиона (Ог) отражает иерархичность пространственного расположения побегов в составе побеговых комплексов. Так, за ось первого порядка принимается ось ветви от ствола, от которой отходят оси второго порядка, на них развиваются оси третьего и т.д. (Рисунок 9д). Этот признак отражает этапность заполнения пространства плахиотропной ветви. В виргинильном и раннем генеративном онтогенетических состояниях у исследованных видов ось ветви (ось первого порядка) одна. Смена порядка ветвления сопровождается резким уменьшением диаметра побегов.

2.3.4 Сравнение трех видов

С целью анализа признаков и сравнения BSS различных морфофункциональных типов у трех видов рода *Ulmus L.* проведен анализ главных компонент. Использована ковариационная матрица, все значения признаков были прологарифмированы. Предварительный анализ показал, что признак количества листьев на максимальном по длине боковом побеге BSS скоррелирован по величине вклада и направленности действия с признаками суммарной площади листовой поверхности такого побега, а также суммарной площади всех боковых побегов BSS. Также оказались скоррелированы признаки количества листьев на осевом побеге BSS и суммарной площадью листовой поверхности этого побега. Таким образом, для характеристики площади листовой поверхности BSS достаточно признаков количества листьев на материнском побеге, на максимальном боковом побеге и на осевом побеге BSS.

Используя редуцированный набор признаков, исходя из выявленных ранее корреляций, проведен анализ главных компонент для BSS всех трех видов (Таблица 1). Полученные в результате главные компоненты, согласно вкладу признаков,

интерпретируются следующим образом: 1) компонента размерных признаков BSS, дифференцирующая «Заполняющие» BSS и все остальные типы; 2) компонента дифференцирует «Заполняющие» BSS на начальных этапах их развития в составе многолетних побеговых комплексов; 3) компонента, описывающая свойства развития во времени «Заполняющих» BSS в составе побеговых комплексов; 4) компонента индивидуальных особенностей BSS исследуемых видов, а также особенностей выборок.

Таблица 1. Вклады исследуемых признаков двулетних побеговых систем трех видов рода *Ulmus L.* в главные компоненты (PC)

	PC1	PC2	PC3	PC4
N б.п.	-2.8026	0.04594	0.5953	0.1125
S 2ПС	-2.6117	-0.17223	-0.301	-0.774
N м.п.	-2.491	-0.38086	0.3534	0.8661
N max.б.п.	-2.5558	0.0417	0.7426	0.1377
N осев.п.	-2.4225	-0.98773	0.0565	0.6355
Шаг	-0.3105	2.37767	-1.2528	0.9973
Порядок	1.9054	-0.20184	1.3919	0.2943
Положение оси	0.815	-1.89434	-1.1835	1.7296
Часть кроны	0.7028	1.21455	1.9861	1.1182
Положение м.п.	0.6566	-2.65404	0.4952	-0.1582
% вклада	42%	21%	11%	8%

N – количество зеленых листьев; S – суммарная площадь листовой поверхности; м.п. – материнский побег; б.п. – боковой побег; 2ПС – двулетняя побеговая система; max.б.п. – максимальный по длине боковой побег; осев.п. – осевой побег

«Ростовые» BSS *U. campestris* имеют максимальные значения размерных характеристик и суммарной площади листовой поверхности, которая достигается за счет количества боковых (Рисунок 10). У *U. glabra* площадь листовой поверхности «Ростовой» 2ПС сопоставима с таковой у *U. campestris*. «Ростовые» BSS *U. parvifolia* имеют меньшие размеры и по площади листовой поверхности сходны с «Основными» 2ПС двух других видов.

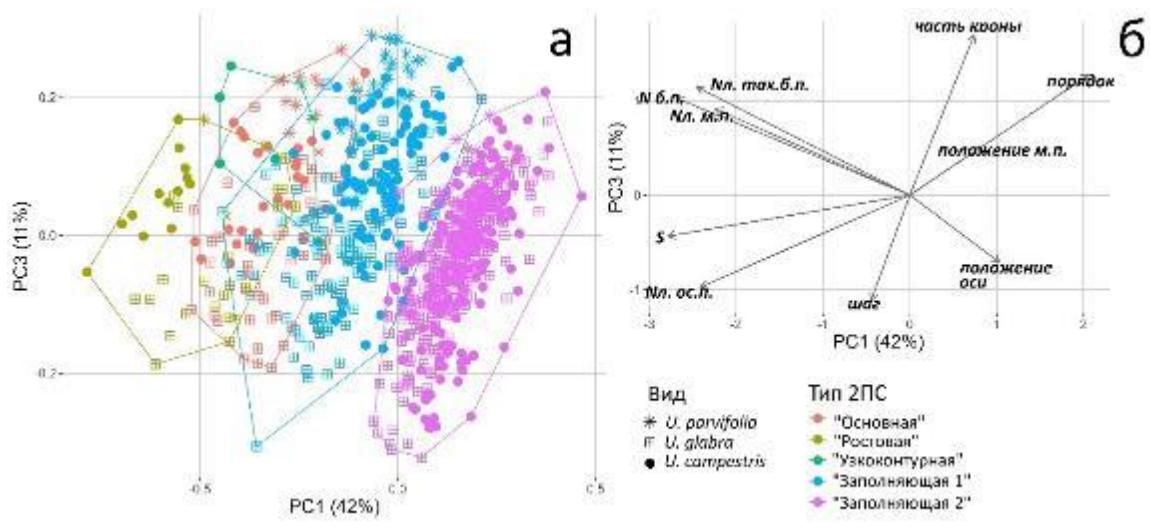


Рисунок 10 – Двухлетние побеговые системы трех исследованных видов различных морфофункциональных типов в пространстве первой и третьей главных компонент
 а – диаграмма рассеяния значений второй и третьей главных компонент для исследованных 2ПС; б – совместные вклады признаков в первую и третью главную компоненты

Дифференциация BSS различных видов в пределах одного морфофункционального типа по третьей главной компоненте становится заметной только у «Заполняющих» BSS, имеющих боковые побеги («Заполняющие 1») (Рисунок 10). Группа двухлетних побеговых систем каждого морфофункционального типа выделяется совместно, что говорит о единстве структурных свойств при организации побеговых комплексов.

Сведения о вкладе побегов различных типов при формировании LA являются важнейшей основой эколого-морфологических исследований [82,83]. Связь между листовыми пластинками и пространственной структурой кроны важна для расчетов продуктивности биомассы целостного древесного растения [84]. Для понимания механизма продукционного процесса и его особенностей у разных видов деревьев необходимо прежде всего изучение закономерностей строения ветвей и возрастной динамики соотношения ассимилирующих и не ассимилирующих органов [85].

В «теоретико-множественном» подходе, который в настоящее время превалирует в научной среде, акцент делается на подробное описание разнообразия свойств элементов [86]. Структурный подход предполагает выявление связи между ними, выявление закономерностей, согласно которым элементы взаимодействуют. Для полноценного исследования сложной биологической системы, которой, несомненно, является крона древесного организма, необходимо сочетание этих двух подходов.

Для исследованных видов рода *Ulmus L.* выделены морфофункциональные типы 2ПС, определяющиеся размерными и структурными признаками. «Ростовые» 2ПС характеризуются большим количеством листьев на материнском, максимальном по длине боковом и осевом побегах, имеют большую суммарную площадь листовой поверхности, располагаются в составе осей низких порядков ветвления в верхних положениях на побегах в составе эпсилонов. Все это позволяет им формировать долгоживущий каркас побеговых комплексов ветвей кроны дерева.

В кроне дерева присутствует большое количество «Заполняющих» 2ПС, которые имеют небольшое количеством листьев, но вносят наибольший вклад в листовую поверхность. При этом двулетние побеговые системы, которые формируются на основе этих побегов, имеют внутреннюю структурную дифференциацию.

«Заполняющие» 2ПС у всех трех видов дифференцируется на две группы, связанные с положением в составе побеговых комплексов и этапами развития этих побеговых комплексов. Первая группа «Заполняющих» 2ПС образуется в ходе развития побеговых комплексов на основе боковых побегов нижних положений на материнском побеге, в большом количестве имеющихся у «Сверхростовых», «Ростовых» и «Основных» 2ПС. Образующиеся таким образом «Заполняющие» системы имеют осевые побеги с большими размерными характеристиками, позволяющие отодвинуть листовую поверхность на периферию побегового комплекса. В дальнейшем при развитии многолетних побеговых комплексов на основе таких побеговых систем образуются «Заполняющие» 2ПС, имеющие мало боковых побегов и, соответственно, не формирующие оси высоких порядков.

Вторая группа «Заполняющих» 2ПС образуется на периферии ветвей на основе боковых побегов верхних положений «Ростовых» и «Основных» 2ПС. Такие 2ПС в составе осей высоких порядков ветвления образуют большую листовую поверхность относительно «Заполняющих» первой группы благодаря боковым и осевым побегам.

Выявленные структурные свойства построения кронового комплекса характерны для всех трех видов рода *Ulmus*. Сочетание свойств площади листовой поверхности и структурных характеристик BSS позволяет создать более обоснованную выборку в сложной картине взаимодействий побегов кроны дерева.

2.4 Наблюдения наземных позвоночных на территории карбонового полигона «Ладога»

Наблюдения проводились в весенне-летний период 12 и 21 мая, 22 июля, 17 августа и 24 сентября 2025 г. Исследования наземных позвоночных, как и в предыдущем сезоне велись на маршрутных учетах. Учеты птиц проводились визуально, и по голосам (весной по песне и брачным крикам, в августе и сентябре по позывкам). Рептилии и земноводные

регистрировались визуально во время маршрутов. При учетах млекопитающих кроме визуальных учетов использовалась приблизительная оценка численности видов по следам их жизнедеятельности. К сожалению, при общих маршрутных учетах отмечаются большие различия в выявляемости видового состава и численности в разных группах наземных позвоночных. Наиболее полно при этом выявляются птицы и млекопитающие крупного и среднего размеров, в то время как мелкие млекопитающие могут быть встречены только случайно.

Как указывалось, ранее, большая часть территории карбонового полигона занята вторичными биотопами сырьими сосново-березово-сероольховыми лесами, переходящими в лесное кочковатое осоковое болото (Рисунок 11). В центральной части участка, имеется небольшое дистрофическое озеро площадью около 2 га, сильно зарастающее по краям тростником и рогозом широколистным. В западной части участка находится песчаный камовый холм с низкотравной луговой растительностью и отдельными группами сосен и лиственных деревьев, преимущественно берез.



Рисунок 11 – Типичный заболоченный биотоп у озера с преобладанием березы, ив и серой ольхи. 12 мая 2025 г.

2.4.1 Орнитофауна

В 2025 г. за пять полевых выездов нами встречено 1853 особи 75 видов птиц (Таблица 2), представляющих 5 отрядов: Поганкообразные – 2 вида, Цаплеобразные – 1 вид, Гусеобразные – 9 видов, Дневные Хищники – 5 видов, Курообразные – 1 вид, Журавлеобразные – 1 вид, Ржанкообразные – 8 видов, Голубеобразные – 1 вид, Кукушкообразные – 1 вид, Совообразные – 1 вид, Дятлообразные – 4 вида, Воробьинообразные - 41 вид.

Таблица 2. Видовой состав и характер пребывания встреченных птиц в 2024-2025 гг.

Русское название	Латинское название	Статус		
		2024	2025	Итоговый статус
Большая поганка	<i>Podiceps cristatus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Красношейная поганка	<i>Podiceps auritus</i>		мигр и гнезд	мигр и гнезд
Серая цапля	<i>Ardea cinerea</i>	мигр	мигр	мигр
Белолобый гусь	<i>Anser albifrons</i>	мигр	мигр	мигр
Гуменник	<i>Anser fabalis</i>		мигр	мигр
Белощекая казарка	<i>Branta leucopsis</i>	мигр	мигр	мигр
Кряква	<i>Anas platyrhynchos</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Чирок-свистунок	<i>A. crecca</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Серая утка	<i>A. strepera</i>	мигр	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Свиязь	<i>Anas penelope</i>	мигр	мигр	мигр
Широконоска	<i>Anas clypeata</i>		мигр	мигр
Хохлатая чернеть	<i>Aythya fuligula</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Луток	<i>M.albellus</i>	мигр		мигр
Канюк	<i>Buteo buteo</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Осоед	<i>Pernis apivorus</i>	мигр и гнезд		мигр и гнезд
Тетеревятник	<i>Accipiter nisus</i>		мигр и гнезд	мигр и гнезд
Перепелятник	<i>Falco subbuteo</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Чеглок	<i>Falco subbuteo</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Дербник	<i>Falco columbarius</i>		мигр и гнезд	мигр и гнезд
Рябчик	<i>Tetrastes bonassia</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Погоныш	<i>Porzana porzana</i>	мигр и гнезд		гнезд
Коростель	<i>Crex crex</i>		мигр и гнезд	мигр и гнезд
Большой улит	<i>Tringa nebularia</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Черныш	<i>T.ochropus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Фифи	<i>T. glareola</i>	мигр и гнезд	мигр	мигр и гнезд
Бекас	<i>Gallinago gallinago</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд

Вальдшнеп	<i>Scolopax rusticola</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Сизая чайка	<i>Larus canus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Озерная чайка	<i>L. ridibundus</i>	мигр и гнезд	мигр	мигр и гнезд
Вяхирь	<i>Columba palumbus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Кукушка	<i>Cuculus canorus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Ушастая сова	<i>Asio otis</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Вертишейка	<i>Jynx torquilla</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Желна	<i>Dryocopus martius</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Большой пестрый дятел	<i>Dendrocopos major</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Белоспинный дятел	<i>D. leucotos</i>	гнезд		гнезд
Малый пестрый дятел	<i>D. minor</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Деревенская ласточка	<i>Hirundo rustica</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Желтая трясогузка	<i>Motacilla flava</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Белая трясогузка	<i>M. alba</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Лесной конек	<i>Anthus trivialis</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Жулан	<i>Lanius collurio</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Крапивник	<i>Troglodytes troglodytes</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Лесная завишка	<i>Prunella modularis</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Зарянка	<i>Erithacus rubecula</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Соловей	<i>Luscinia luscinia</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Горихвостка–лысушка	<i>Phoenicurus phoenicurus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Черный дрозд	<i>Turdus merula</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Дрозд–рябинник	<i>T. pilaris</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Белобровик	<i>T. iliacus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Барсучок	<i>A. schoenobaenus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Садовая камышевка	<i>Acrocephalus dumetorum</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Садовая славка	<i>Sylvia borin</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд

Славка–завишка	<i>S. curruca</i>	мигр и гнезд		мигр и гнезд
Серая славка	<i>S. communis</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Пеночка-весничка	<i>Phylloscopus trochilus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Пеночка-теньковка	<i>Ph. collybita</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Пеночка–трещотка	<i>Ph. sibilatrix</i>	мигр и гнезд		мигр и гнезд
Зеленая пересмешка	<i>Hippolais icterina</i>		мигр и гнезд	мигр и гнезд
Желтоголовый королек	<i>Regulus regulus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Мухоловка–пеструшка	<i>Ficedula hypoleuca</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Пухляк	<i>Parus montanus</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Большая синица	<i>P. major</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Лазоревка	<i>P. caeruleus</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Длиннохвостая синица	<i>Aegithalos caudatus</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Пищуха	<i>Certhia familiaris</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Обыкновенная овсянка	<i>Emberiza citrinella</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Камышовая овсянка	<i>E. schoeniclus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Зяблик	<i>Fringilla coelebs</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Чиж	<i>Spinus spinus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Чечевица	<i>Carpodacus erythrinus</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Зеленушка	<i>Chloris chloris</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Снегирь	<i>Pyrrhula pyrrhula</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Полевой воробей	<i>Passer montanus</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Домовый воробей	<i>Passer domesticus</i>		гнезд	гнезд
Иволга	<i>Oriolus oriolus</i>		мигр и гнезд	мигр и гнезд
Скворец	<i>Sturnus vulgaris</i>	мигр и гнезд	мигр и гнезд	мигр и гнезд
Сойка	<i>Garrulus glandarius</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Сорока	<i>Pica pica</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Ворона	<i>Corvus cornix</i>	гнезд	гнезд	гнезд
Ворон	<i>C. corax</i>	гнезд	гнезд	гнезд

Видовой состав и численность птиц в 2025 г. Незначительно отличались от результатов обследования 2024 г., когда было выявлено 1765 особей 73 видов. Как видно из Таблицы 2, по сравнению с предыдущим сезоном в 2025 г. нами не были встречены такие

редкие и малочисленные виды, как луток, осоед, погоныш, белоспинный дятел, славка-завишка, пеночка-трещотка. В тоже время в этом сезоне мы впервые отметили присутствие в районе исследований красношайной поганки (Рисунок 12), тетеревятника, дербника, широконоски, коростеля, зеленой пересмешки, домового воробья. Скорее всего это является результатом случайного вероятностного фактора и связано с увеличением общего количества учетных дней.



Рисунок 12 – Красношайные поганки на озере 21 мая 2025 г.

Из всех встреченных в 2025 г. видов 16 было только гнездящимися оседлыми видами, 53 вида были гнездящимися мигрирующими птицами и 6 видов отмечены только на миграциях, при чем три из них, белолобый гусь, гуменник и белощекая казарка (Рисунок 13), наблюдались только на транзитном пролете через район наблюдений.



Рисунок 13 – Стая белощеких казарок. 21 мая 2025 г.

Таким образом за два сезона исследований нам было отмечено 3618 особей 81 вида птиц. К чисто гнездящимся оседлым птицам по результатам 2х лет исследований можно отнести 15 видов, гнездящимся и мигрирующим – 59 видов, только к мигрирующим – 7 видов (Таблица 3).

Таблица 3. Численность встреченных птиц

Русское название	12 мая	21 мая	22 июля	17 августа	24 сентября	Всего 2025 г.	Всего в 2024 г.	Всего за два года
Большая поганка	2	4		4	1	11	7	18
Красношайная поганка	2			5		7		7
Серая цапля			3	2	1	6	3	9
Белолобый гусь					125	125	245	370
Гуменник					45	45		45
Белощекая казарка		45				45	45	90
Кряква	5	2		7	8	22	20	42
Чирок-свистунок		2		6	2	10	10	20
Серая утка	1			2		3	1	4
Свиязь					6	6	4	10
Широконоска	2		1			3		3
Хохлатая чернеть	4	3	2	2	5	16	11	27
Луток						0	2	2
Канюк		2	1	1		4	1	5
Осоед						0	1	1
Тетеревятник		1			1	2	1	3
Перепелятник			1	2		3	3	6
Чеглок	1	1	2	2		6	3	9
Дербник				1		1		1
Рябчик		2			4	6	1	7
Погоныш						0	1	1
Коростель		1	1			2		2
Большой улит	1	2		3		6	2	8
Черныш	3	2	1			6	2	8
Фифи			4	2		6	3	9
Бекас	3	2		1		6	4	10
Вальдшинеп	4	3			2	9	3	12
Сизая чайка	4	2		4	6	16	11	27
Озерная чайка	3	4	2	5		14	9	23
Вяхирь	2	4	2	1		9	7	16
Кукушка	1	1	1			3	3	6
Ушастая сова	1			2		3	1	4
Вертишайка	2	1	1			4	2	6
Желна	1			1	1	3	2	5

Большой пестрый дятел	3	2	3	1	5	14	16	30
Белоспинный дятел						0	1	1
Малый пестрый дятел	1	2		1	2	6	4	10
Деревенская ласточка		6	12	19	4	41	38	79
Желтая трясогузка	6	5	4	9	1	25	21	46
Белая трясогузка	6	8	19	15	3	51	58	109
Лесной конек	14	26	14	29	8	91	91	182
Жулан		1	3	2		6	5	11
Крапивник	5	11	6	14	9	45	40	85
Лесная завишка	1	2				3	2	5
Зарянка	4	25	11	14	8	62	62	124
Соловей	2	4				6	8	14
Горихвостка—лысушка	1	1		3		5	2	7
Черный дрозд	8	14	7	9	12	50	36	86
Дрозд-рябинник	9	11	9	16	43	88	71	159
Белобровик	1	3	2	5	13	24	27	51
Барсучок		21	15	8		44	27	71
Садовая камышевка	1	3	3			7	6	13
Садовая славка		11	4			15	8	23
Славка—завишка						0	1	1
Серая славка		4	2	3		9	3	12
Пеночка-весничка	14	34	21	43	3	115	103	218
Пеночка-теньковка	5	8	5	11		29	30	59
Пеночка—трещотка						0	7	7
Зеленая пересмешка		1	1			2		2
Желтоголовый королек	4	6	1	12	19	42	42	84
Мухоловка—пеструшка	1	4				5	5	10
Пухляк	4	6	4	14	8	36	31	67
Большая синица	11	17	12	28	32	100	89	189
Лазоревка	1	3	2	2	5	13	14	27
Длиннохвостая синица	4	16	7	32	46	105	122	227
Пищуха	1	1		2	1	5	1	6

Обыкновенная овсянка	2	1	1	3	5	12	7	19
Камышовая овсянка	1	2		4		7	3	10
Зяблик	21	45	21	25	8	120	131	251
Чиж	8	9	5	9	24	55	50	105
Чечевица		1	2			3	1	4
Зеленушка	4	5	3	11	2	25	18	43
Снегирь	2	1	1		5	9	12	21
Полевой воробей	3	4	5	8	3	23	30	53
Домовый воробей		8	2		3	13		13
Иволга		1	1	3		5		5
Скворец	6	4	15	19	4	48	63	111
Сойка	1		2	3	5	11	15	26
Сорока	1	2	1		5	9	7	16
Ворона	6	5	11	9	21	52	42	94
Ворон	2	1	1	4	1	9	7	16
Всего	206	429	260	443	515	1853	1765	3618

Всего за 5 выездов в 2025 г. встречено 1853 птиц, при этом наибольшее их количество отмечено 24 сентября, что, связано с пиком осенних миграций у большинства видов. Кроме того, сопоставимо высокая численность встреченных птиц отмечалась 21 мая и 17 августа. Это мы связываем с тем, что кроме местных размножающихся птиц, на обследованной территории присутствовало заметное количество поздних мигрантов (21 мая) или мигрирующих и кочующих насекомоядных птиц (17 августа). По суммарным данным всех учетов в 2025 г. доминировали белолобый гусь и зяблик (самые массовые мигрирующий и гнездящийся виды соответственно), субдоминантами были пеночка-весничка (Рисунок 14), большая и длиннохвостая синицы. Незначительно им уступали в численности такие массовые виды как были лесной конек (Рисунок 14) и дрозд-рябинник. Многочисленны были гуменник, и белощекая казарка (оба вида на транзитной миграции), белая трясогузка, зарянка, черный дрозд, барсучок, желтоголовый королек, чиж и скворец. Самыми малочисленными встреченными видами были большая и красношайная поганки (Рисунок 12) серая цапля, серая утка, широконоска, свиязь, канюк, осоед, тетеревятник, чеглок, дербник рябчик, коростель, большой улит, ушастая сова, вертишейка (Рисунок 15), желна, зеленая пересмешка, мухоловка-пеструшка, пищуха, чечевица, иволга. В целом, изменения в видовой структуре и численностях отдельных видов за два года крайне незначительны и в наибольшей степени на наш взгляд связаны со случайными факторами (ошибка наблюдателя и кратковременные изменения населения и активности птиц в дни наблюдений и вне них). Наибольшая численность и количество видов птиц, как и в предыдущий сезон наблюдались в заболоченном мелколиственном лесу.



Рисунок 14 – Пеночка-весничка и лесной конек. 21 мая 2025 г.



Рисунок 15 – Вертишайка. 21 мая. 2025 г.

2.4.2 Земноводные и рептилии

За пять выездов нами встречено 149 особей 6 видов земноводных и рептилий. Из них было 4 вида земноводных и 2 вида рептилий (Таблица 4). По сравнению с предыдущим сезоном удалось выявить новый вид – озерную лягушку, которая оказалась обычной на заболоченном озере, которое весьма трудно для обследования из-за сильно заболоченных берегов. Все отмеченные нами виды являются обычными и фоновыми для региона. Наибольшее количество встреч наблюдалось в конце мая, что связано с повышенной весенней активностью животных. Самым массовым видом была остромордая лягушка, встречающаяся во всех типах сырых местообитаний и на озере. Реже всего, как и в предыдущий сезон отмечалась обыкновенная гадюка (*Vipera berus*), что отчасти может быть связано с ее скрытым образом жизни в дневное время.

Таблица 4. Встреченные виды земноводных и рептилий

Русское название	Латинское название						Всего		
		12 мая	21 мая	22 июля	17 августа	24 сентября	2025 г.	2024 г.	Всего за два года
Остромордая лягушка	<i>Rana arvalis</i>	9	17	21	16		63	86	149
Травяная лягушка	<i>Rana temporaria</i>	3	2	7			12	16	28
Озерная лягушка	<i>Pelophylax ridibundus</i>	7	11	6	4		28		28
Обыкновенный тритон	<i>Lissotriton vulgaris</i>	5	8				13	12	25
Обыкновенная гадюка	<i>Vipera berus</i>	3	2	1	1		7	5	12
Живородящая ящерица	<i>Zootoca vivipara</i>	2	9	4	11		26	17	43
Всего		29	49	39	32	0	149	136	285

2.4.3 Млекопитающие

В 2025 г. за время всех выездов на обследованной территории выявлено присутствие 14 видов млекопитающих (Рисунок 16). В 10 случаях было подтверждено присутствие всех видов, обнаруженных ранее в 2024 г. Кроме того, в 2025 г. впервые отмечены еще 4 вида местной териофауны – средняя бурозубка, желтогорлая мышь, полевка-экономка и ласка. Судя по всему, видовой состав мелких насекомоядных и грызунов на исследуемой территории выявлен далеко не полностью и гораздо богаче приведенного ниже аннотированного списка (Таблица 5). В настоящее время можно утверждать, что среди

выявленных видов именно средняя бурозубка, желтогорлая мышь и полевка-экономка являются наиболее массовыми. Ко второй по многочисленности группе следует отнести обыкновенного крота, обыкновенного ежа, водяную полевку и ласку. Достаточно обычны также обыкновенная белка, ондатра, водяная полевка, горностай и американская норка. Обыкновенная лисица (Рисунок 16) и копытные являются самой малочисленной группой. По нашей оценке, прошлого года, на данной территории постоянно присутствует не менее 1-2 лисиц, 10-15 кабанов и 2-3 лося, при этом в зимнее время возможны заходы до 5-10 лосей.

Таблица 5. Видовой состав встреченных млекопитающих

Русское название	Латинское название	Статус в 2024 г	Статус в 2025 г
Средняя бурозубка	<i>Sorex caecutiens</i>		Трупик зверька обнаружен на обочине лесной тропы 17 августа
Обыкновенный крот	<i>Talpa europaea</i>	обычен на сырых луговинах	обычен на сырых луговинах
Обыкновенный еж	<i>Erinaceus europaeus</i>	Одиночные особи встречены в августе и сентябре на опушке заболоченного мелколиственного леса	Одиночные особи встречены 22 июля и 17 августа на опушке заболоченного мелколиственного леса
Желтогорлая мышь	<i>Apodemus flavicollis</i>		21 мая в заболоченном мелколиственном лесу обнаружен зверек в дупле гнилой ольхи на высоте 1,8 м. над землей
Обыкновенная белка	<i>Sciurus vulgaris</i>	Обычный, но немногочисленный вид лесных насаждений	Одиночные зверьки отмечались в лесу во время всех учетов
Ондатра	<i>Ondatra zibethicus</i>	Следы деятельности зверьков (кормовые столики) найдены среди тростниковых кочек у озера	Плавающие зверьки отмечались на озере в мае-июле
Водяная полевка	<i>Arvicola amphibius</i>	Одиночная особь встречена 19 августа на березовой кочке среди	Следы жизнедеятельности (кормовые столики и норки) и одиночные зверьки отмечались в тростниках в мае-июле

		тростниково-рогоузового болота	
Полевка-экономка	<i>Microtus oeconomus</i>		Два зверька были выловлены ловушками на краю заболоченного луга 22 июля
Кабан	<i>Sus scrofa</i>	В августе и сентябре отмечены многочисленные порои кабанов на сырых луговинах у границы с мелколиственным лесом	Порои кабанов отмечались во время всех учетов. В сентябре встречена самка с 4 молодыми зверями в тростниках у озера
Лось	<i>Alces alces</i>	В мае до отрастания травы в мелколиственном сырому лесу были многочисленны находки зимнего помета лосей.	Регулярно отмечались кучки зимнего помета в лесу. В августе в тростниках встречен одинокий годовалый самец лося.
Обыкновенная лисица	<i>Vulpes vulpes</i>	На участках сырого грунта в нескольких местах в мелколиственном лесу 19 августа обнаружены следы зверя	24 сентября на лугах встречена одиночная особь
Американская норка	<i>Neogale vison</i>	На участках сырого грунта в нескольких местах в мелколиственном лесу 19 августа обнаружены следы зверя	22 июля в тростниках на берегу озера встречена охотящаяся за ондатрами норка
Горностай	<i>Mustela erminea</i>	На участках сырого грунта в нескольких местах в мелколиственном лесу 19 августа обнаружены следы зверя	21 мая на опушке сырого леса встречана взрослая особь
Ласка	<i>Mustela nivalis</i>		12 мая на опушке лесного массива отмечена охотящаяся особь



Рисунок 16 – Обыкновенная лисица на луговом склоне холма. 24 сентября 2025 г.

2.4.4 Результаты обследования животного мира карбонового полигона «Ладога»

Полученные в 2025 г. результаты в целом сходны с данными прошлого года. Различия в видовых списках на наш взгляд связаны в первую очередь с увеличением выявляемости ряда видов по мере увеличения количества наблюдений (исследовательских усилий) а также случайным фактором (вероятностью встреч редких, эпизодически посещающих данный район видов при нескольких суточных наблюдениях за сезон). Как указывалось, ранее, в целом видовой состав и численность сообществ наземных позвоночных животных являются типичными для аналогичных местообитаний в южной части Карельского перешейка с сильной степенью рекреационных нагрузок [87]. Среди птиц отмечено:

1. Большое видовое разнообразие и высокая численность лесных воробыиных птиц
2. Малая численность и бедный видовой состав гусеобразных птиц, чайковых и куликов
3. Преобладание в последней группе транзитных мигрантов

Это обусловлено преобладанием на данной территории переувлажненных смешанных лесных биотопов, наличием небольшого дистрофного водоема среди болотного массива, являющимся малопривлекательным для водоплавающих птиц биотопом, и пролеганием в районе исследований традиционного миграционного пути с Ладожского озера на Финский залив, являющегося одним из отрезков Беломорско-Балтийского

пролетного пути. С малой вариативностью местных биотопов связано и низкое видовое разнообразие герпетофауны и териофауны. Низкая представленность крупных млекопитающих отчасти обусловлена соседством большого количества населенных пунктов, препятствующего появлению на территории крупных осторожных видов, таких как волк, рысь и бурый медведь. Некоторые виды, например, зайцы, были явно недоучтены при нашем обследовании из-за малого количества участков открытого грунта, на которых были бы видны их следы.

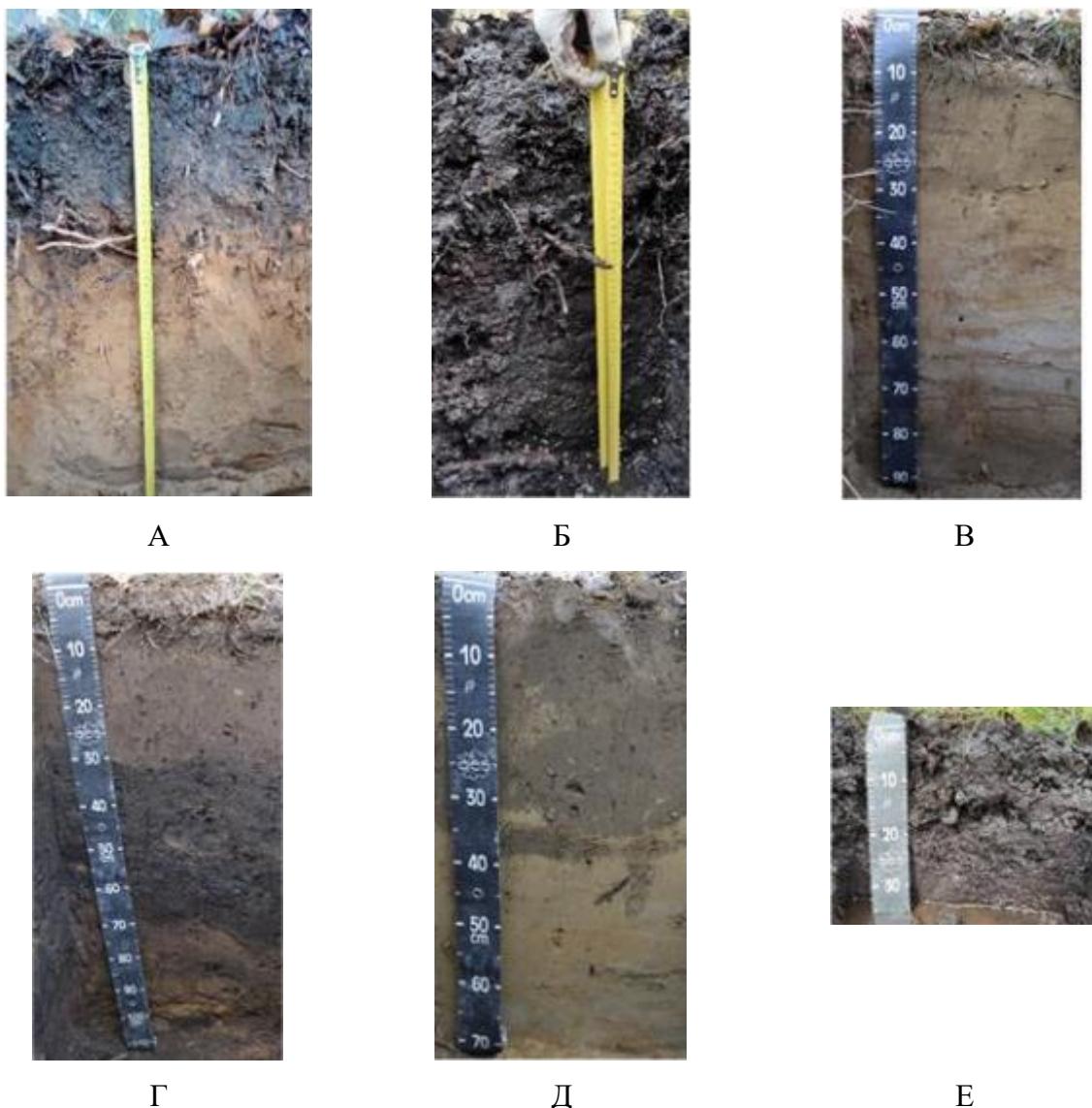
Результаты этого года подтверждают наши предварительные расчеты и оценки прошлого года. Так, по нашей приблизительной оценке плотность гнездящихся птиц на обследованном участке составляет около 480 особей на 1 км², что близко к типичной для смешанных сырых лесных биотопов южной тайги – 500 особей на 1 км² [88]. Таким образом биомасса птиц может варьировать в пределах около 23-27 кг/км². Учитывая, что основу местных орнитокомплексов составляют мелкие воробьиные птицы, у которых масса пищи, потребляемой в сутки, составляет 50-80 % их массы, можно полагать, что в изучаемом районе в сутки утилизируется органическое вещество в пределах от 11,5 до 21,6 кг/км² в сутки и соответственно от 1725 до 3240 кг/км² за 150 дней теплого периода с начала мая до конца сентября. В холодный период величина утилизации органического вещества должна многократно снижаться из-за резкого снижения численности и видового разнообразия зимующих птиц.

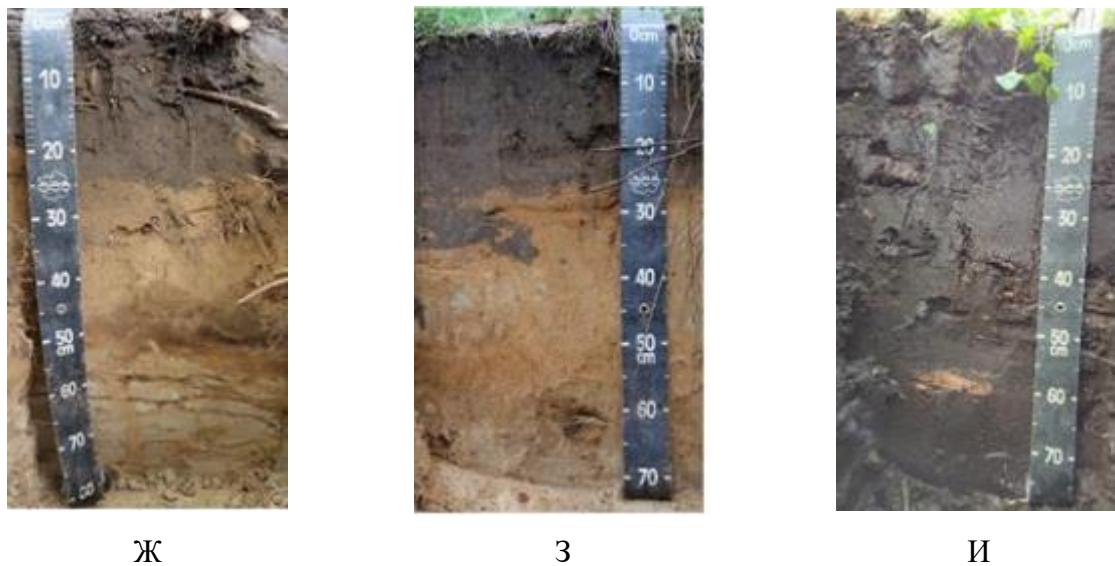
Встречи крупных млекопитающих на обследованной территории единичны и скорее всего не вносят заметного вклада в биомассу млекопитающих на данном участке, в отличие от мелких грызунов и насекомоядных видов, общая биомасса которых в ненарушенных и слабонарушенных сообществах обычно составляет около 500 грамм на 1 га или 50 кг/км², что заметно ниже подобных показателей у птиц. Учитывая, что в сутки мелкие мышевидные грызуны поедают количество корма сопоставимое с собственным весом то утилизация ими органического вещества может составлять от 40 до 50 кг/км² в сутки или около 14600 - 18250 кг/км² за год, поскольку все мелкие млекопитающие резидентны для данной территории и в течение годы их кормовые потребности мало варьируют.

Таким образом видно, что на данной территории вклады в утилизацию живого органического вещества мелкими млекопитающими заметно выше чем у птиц. В сумме совместная годовая утилизация органического вещества обоими группами позвоночных может составлять от 16325 до 21490 кг/км². Эти показатели можно брать для расчетов накопления органического вещества в почвах в результате жизнедеятельности животных.

2.5 Особенности строения почвенного покрова объединенного карбонового полигона «Ладога»

Почвы камовых возвышенностей представлены дерново-подбурами оподзоленными иллювиально-железистыми на камовых супесях. Формула почвенного профиля – О – АYe – ВF – ВС – С. Почвы залежных земель представлены агроземами среднепахотными иллювиально-железистыми постагрогенными на камовых супесях, а также агроземами глубокопахотными иллювиально-железистыми постагрогенными псевдофибрзовыми на камовых супесях. Формула почвенного профиля – О – АYpa – ВF – С. На гидроморфных позициях развиваются торфяно-перегнойные эутрофные почвы. Формула профиля ТЕ-ТТ. Почвенное разнообразие карбонового полигона «Ладога» представлено на Рисунке 9.





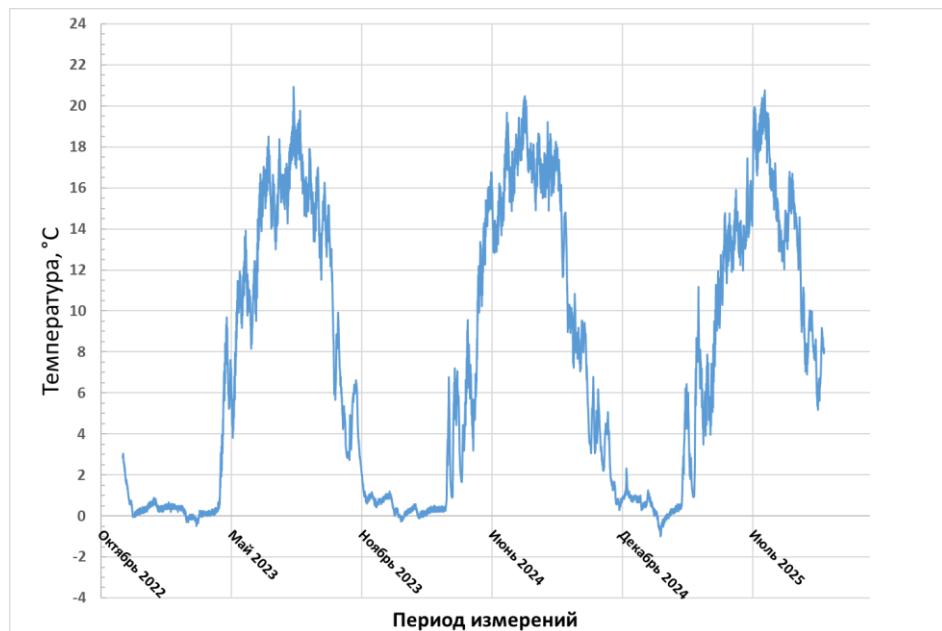
Ж

З

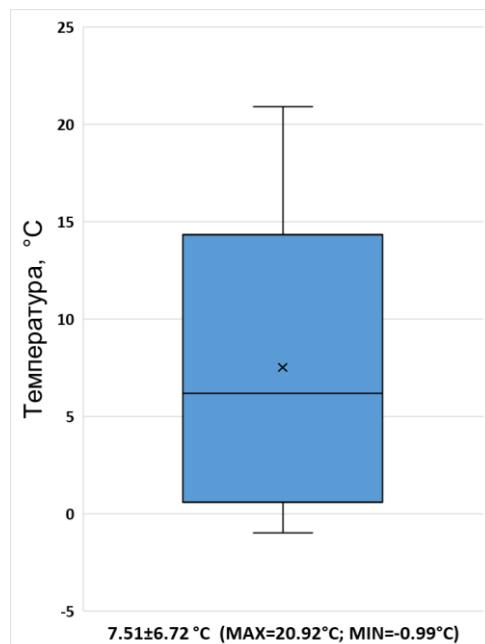
И

Рисунок 9 – Почвенное разнообразие карбонового полигона «Ладога». А - дерново-подбур
оподзоленный иллювиально-железистый на камовых супесях; Б, Е - торфяно-перегнойные
эутрофные; В, Г, Д, Ж, З, И - агроземы средне-глубокопахотные постагрогенные
иллювиально-железистые.

2.5.1 Температурный режим почв объединенного карбонового полигона «Ладога»
 Мониторинг температурного режима почв проводится с ноября 2022 года. Регистраторы температуры были установлены на двух репрезентативных участках территории – на вершине камового холма, на дренированной территории, а также в полугидроморфном ландшафте низинного болота. Глубина заложения 10 см. Мониторинг температурного режима почв осуществлялся с применением автоматических логгеров температуры и влажности InkBird IBS-TH2 (производство Inkbird Tech. C.L., Китай). Регистрация данных производилась на глубине 10 см с интервалом 120 минут. Результаты измерений представлены на Рисунке 10.



A



Б

Рисунок 10 – Динамика температуры почв за период исследования на глубине 10 см.

Дренированная позиция (CP1) характеризуется более контрастным термическим режимом с более низкими температурами в зимний период и более высокими — в летний. В январе 2023 года температура в CP1 достигала 0 °C, что на 2°C ниже, чем на заболоченном участке (CP2). Напротив, в период летнего максимума в июле 2023 года в CP1 зафиксирована температура +21°C, что на 1.7°C выше показателей CP2. Заболоченный участок (CP2) демонстрирует выраженный буферный эффект — меньшую амплитуду

годовых колебаний и запаздывание фаз температурного цикла, что особенно заметно в периоды сезонных переходов. Весенний прогрев на заболоченной территории происходит медленнее, с отставанием на 0,8–1,2°C в апреле, тогда как осенне охлаждение — более плавно. Установленные различия отражают влияние гидрологического режима на тепловые свойства почв: высокая теплоемкость насыщенных влагой торфяных почв СР2 обуславливает их инерционность, в то время как лучший дренаж в СР1 способствует более интенсивному сезонному прогреву и выхолаживанию.

2.5.2 Физико-химические параметры почв объединенного карбонового полигона «Ладога»

Проведенные исследования выявили значительную пространственную дифференциацию изученных почвенных профилей, обусловленную их приуроченностью к различным элементам рельефа с перепадом абсолютных отметок до 40 метров. Данный фактор рельефообразования обуславливает формирование контрастных гидроморфных условий почвообразования на территории карбонового полигона. Полученные результаты представлены в Таблице 6.

Кислотно-основные свойства почв определяли потенциометрическим методом с использованием портативного pH-метра Milwaukee Mi106 (Milwaukee Electronics, США). Перед проведением измерений выполнялась калибровка прибора по стандартным буферным растворам с pH 7,01 и 4,01. Актуальную кислотность ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) устанавливали в водной суспензии при соотношении почва: вода 1:2,5, а для органогенных горизонтов — 1:25. В образцах со значениями $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} < 7$ дополнительно определяли обменную кислотность (pH_{KCl}) в солевой вытяжке с 1,0 н. раствором хлористого калия, приготовленной в аналогичных весовых пропорциях.

Пространственный анализ кислотно-основных свойств верхнего горизонта почв (0–10 см, n=61) выявил значительную вариабельность показателей. Значения актуальной кислотности ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) варьируют в диапазоне от 3,9 до 5,8.

Параметры обменной кислотности (pH_{KCl}) характеризуются ещё более выраженной кислотностью — от 3,0 до 5,5, с четко выраженным максимумом в диапазоне 4,0–4,1 (n=17). Сдвиг показателей pH_{KCl} в более кислую область по сравнению с $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ свидетельствует о значительном содержании в почвенном поглощающем комплексе обменных оснований, преимущественно алюминия и водорода. Выявленные особенности указывают на активное протекание процессов кислотного выветривания.

Проведенный анализ показал, что значения кислотности почв варьируют в диапазоне от сильнокислой до кислой, отражая как литолого-геохимические особенности

почвообразующих пород, так и дифференциацию современных почвообразовательных процессов в условиях контрастного рельефа.

Таблица 6. Профильное распределение основных физико-химических параметров в почвах карбонового полигона «Ладога»

ID почвы	Горизонт	Мощность, см	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Плотность сложения, г/см ³	Сорг, %	Запасы углерода в слое 0-100 см, кг/м ²
CP1	O	0-2	5,9	5,2	0,8	7,54	8,5
	AYe	2-13	5,6	4,5	0,9	3,33	
	BF	13-34	5,9	4,7	1,5	0,62	
	BC	34-45	5,9	5,3	1,4	0,19	
	C	45-79	6,0	4,9	1,6	0,17	
CP2	TE ₁	0-10	5,2	4,9	0,2	38,4	85,9
	TE ₂	10-20	5,3	4,6	0,3	41,9	
	TE ₃	20-30	4,7	4,6	0,2	46,3	
	TE ₄	30-40	4,1	3,5	0,2	43,8	
	TT	40-50	3,7	3,3	0,2	40,49	
CP3	O	0-1	5,6	5,4	0,3	16,15	10,0
	AO	1-8	5,0	4,3	0,3	5,08	
	AYpa	8-30	4,4	4,2	1,4	1,22	
	BFff	30-50	4,8	4,5	1,2	0,59	
	BCff	50-80	5,3	4,5	1,2	0,45	
	Cg,ff	80-100	4,8	4,4	1,3	0,54	
CP4	O	0-2	5,2	5,0	0,4	16,6	28,3
	AYpyr	2-30	4,2	3,7	1,0	2,96	
	PYR	30-70	4,4	3,8	0,9	3,95	
	C	70-100	4,4	4,1	1,0	1,46	
CP5	O	0-1	-	-	0,15	16,8	13,6
	AYpa	1-40	4,9	4,3	1,2	1,93	
	BFff	40-60	5,0	4,5	1,3	0,61	
	Cg,ff	60-75	5,1	4,6	1,2	0,53	
CP6	TE ₁	0-15	4,4	3,9	0,11	36,54	63,2
	TE ₂	15-30	4,1	3,8	0,15	44,51	
CP7	TE ₁	0-15	4,7	4,3	0,11	41,29	66,9
	TE ₂	15-30	4,8	4,3	0,15	46,19	
CP8	O	0-2	-	-	0,5	20,9	10,7
	AYpa	2-10	5,3	4,6	0,7	2,84	
	BF	10-15	5,2	4,3	1,1	0,47	
	BC	15-35	5,2	4,5	1,2	0,36	
	BCff	35-70	5,2	4,7	1,3	1,11	
	C	70-80	5,0	4,6	1,1	0,31	
CP9	O	0-2	-	-	0,3	16,65	9,9
	AY	2-15	4,7	4,1	1,0	2,25	
	BHF	15-27	5,0	4,2	1,3	1,15	
	BC	27-40	4,9	4,4	1,1	0,56	
CP10	O	0-1	-	-	0,2	41,7	17,0

	AYpa	1-24	3,9	3,8	1,1	4,33	
	BF	24-45	4,8	4,3	1,2	0,84	
	BH	45-55	4,6	4,3	1,2	0,95	
	BCff	55-70	4,5	4,3	1,3	0,47	
	Cff	70-90	4,9	4,4	1,4	0,37	
CP11	AY ₁	0-20	4,7	4,0	0,7	5,62	32,8
	AY ₂	20-40	4,9	4,1	0,8	6,57	
	AYg ₁	40-60	4,7	4,4	0,8	4,66	
	AYg ₂	60-80	5,0	4,4	0,3	6,18	
CP12	AYpa	0-27	4,6	4,1	0,9	1,78	10,6
	BF	27-50	4,9	4,2	1,1	0,72	
	Cff	50-85	4,7	4,3	1,4	0,60	
CP13	AYpa	0-30	4,8	4,0	1,1	1,72	10,7
	BF	30-60	5,0	4,5	1,1	0,64	
	C	60-80	5,3	4,6	1,4	0,51	
CP14	AYpa	0-45	4,6	3,9	1,3	2,03	16,0
	BF	46-65	4,9	4,3	1,0	1,04	
	Cff	65-85	5,1	3,8	1,3	0,51	
CP15	TE ₁	0-20	4,8	3,8	0,2	48,8	50,3
	TE ₂	20-40	5,1	4,0	0,1	51,5	
	TE ₃	40-50	4,9	3,9	0,1	48,9	
	TT	50-80	5,1	4,0	0,1	51,44	

Проведенные исследования выявили закономерность увеличения значений рН по почвенному профилю в большинстве изученных разрезов, за исключением органогенных почв, где кислотно-основные показатели не изменялись с глубиной.

Содержание общего углерода в почвах характеризуется значительной вариабельностью, обусловленной генетическим разнообразием почв. Количественное определение общего углерода выполнялось на элементном CHNS-анализаторе LECO TruSpec MICRO в режиме трехкратной аналитической повторности в Ресурсном центре «Методы анализа состава вещества» Научного парка СПбГУ. Учитывая незначительное содержание карбонатов в исследуемых почвах, концентрация общего углерода была эквивалентна содержанию органического углерода (Сорг).

Плотность сложения почвы определялась стандартным гравиметрическим методом через соотношение массы абсолютно сухой почвы (сушка при 105°C) к объёму ненарушенного образца. Отбор проб производился тонкостенными металлическими цилиндрами объёмом 75 см³ в двукратной повторности.

Расчёт запасов органического углерода выполнялся по общепринятой методике посредством суммирования запасов по генетическим горизонтам в пределах фиксированной глубины профиля. Запасы углерода в каждом горизонте определялись как произведение содержания Сорг, объёмной массы горизонта и его мощности с последующим пересчётом в размерность кг/м².

Анализ распределения органического углерода в почвах исследуемой территории выявил чёткую генетическую обусловленность. В постагрогенных иллювиально-железистых почвах наблюдается аккумуляция органического вещества преимущественно в верхних органогенных и гумусовых горизонтах (О, АО, АУ) и резким снижением содержания углерода в иллювиальной части профиля. Показатели содержания гумуса в подбурах характеризуются значительной вариабельностью: в верхних горизонтах среднее значение составляет 9,11%, тогда как в иллювиально-железистых горизонтах фиксируется существенно более низкое содержание - в среднем 0,59% с диапазоном величин от 0,17% до 1,15%.

В торфяных эутрофных почвах установлена принципиально иная закономерность вертикального распределения органического углерода с максимальной аккумуляцией в срединной части профиля. Среднее содержание Сорг в этих почвах достигает 44,63% с диапазоном величин от 36,45% до 54,54%, что отражает специфику процессов торфообразования в условиях повышенного гидроморфизма. Выявленные различия в распределении и запасах органического углерода свидетельствуют о существенной дифференциации процессов накопления органического вещества в зависимости от генезиса и почвенного гидроморфизма.

Анализ содержания органического углерода (Сорг) в верхнем слое почв (0-10 см) на территории карбонового полигона «Ладога» также выявил значительную пространственную дифференциацию, обусловленную генетическими особенностями почв и характером землепользования (Рисунок 11).

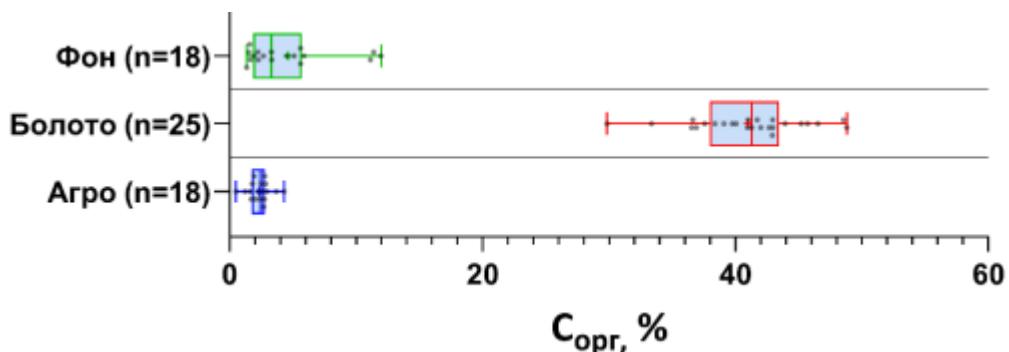


Рисунок 11 – Содержание углерода органических соединений (Сорг), % в слое 0-10 см в различных категориях почв. Фон – условно фоновые почвы под вторичным древостоем на камовых возвышенностях, Болото – почвы гидроморфных и полугидроморфных ландшафтов в заболоченных понижениях, Агро – постагрогенные старопахотные почвы

Наибольшие концентрации Сорг зафиксированы в гидроморфных и полугидроморфных ландшафтах, где среднее значение составляет $41,0 \pm 4,45\%$

вариабельность значений составляет от 29,9% до 48,82% ($n=25$). В автоморфных почвах содержание углерода существенно ниже — в среднем $4,62\pm3,51\%$ ($n=18$) с диапазоном величин от 1,36% до 11,98%. Наименьшие и наименее вариативные значения характерны для постагренических почв, где средняя концентрация Сорг составляет $2,37\pm0,87\%$ ($n=18$) при колебаниях от 0,50% до 4,33%.

При переводе валовых концентраций органического углерода в абсолютные запасы ($\text{кг}/\text{м}^2$) для почв фоновых территорий выявлена значительная пространственная вариабельность (Рисунок 12).

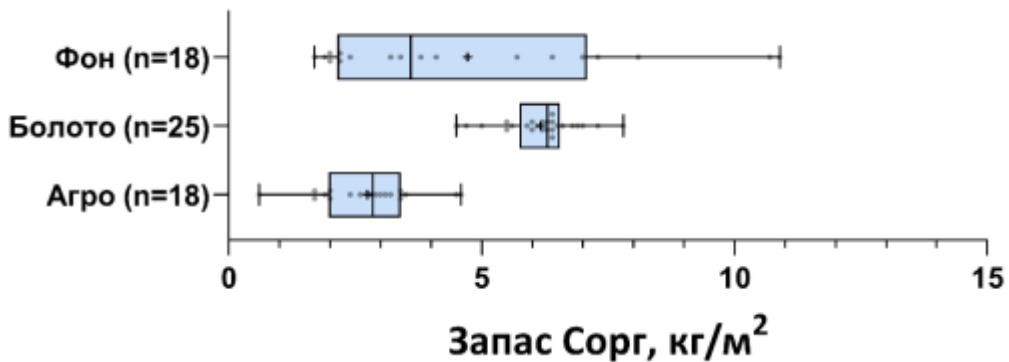


Рисунок 12 – Запасы углерода органических соединений (Запас Сорг), $\text{кг}/\text{м}^2$ в слое 0-10 см в различных категориях почв. Фон – условно фоновые почвы под вторичным древостоем на камовых возвышенностях, Болото – почвы гидроморфных и полугидроморфных ландшафтов в заболоченных понижениях, Агро – постагренические старопахотные почвы

Сравнительный анализ запасов органического углерода в слое 0-10 см выявил статистически значимые различия между генетическими группами почв. Фоновые почвы характеризуются средним запасом $4,7\pm3,0 \text{ кг}/\text{м}^2$ с диапазоном значений ($1,7-10,9 \text{ кг}/\text{м}^2$), отражающей неоднородность автоморфных ландшафтов. Торфяно-эутрофные почвы демонстрируют максимальные и наименее вариативные показатели — $6,2\pm0,76 \text{ кг}/\text{м}^2$ с диапазоном значений $4,48-7,81 \text{ кг}/\text{м}^2$, подтверждая стабильный секвестрационный потенциал гидроморфных экосистем. Постагренические почвы имеют минимальные средние запасы $2,8\pm1,0 \text{ кг}/\text{м}^2$ ($0,63-4,63 \text{ кг}/\text{м}^2$). Полученные значения запасов коррелируют с установленными закономерностями распределения валового содержания Сорг и подтверждают определяющую роль почвенного гидроморфизма в аккумуляции углерода.

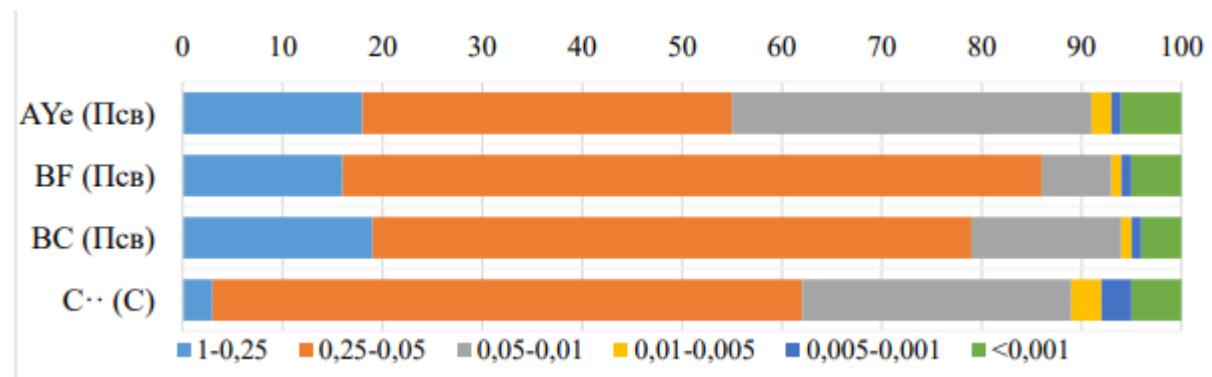
Указанный разброс значений демонстрирует существенную неоднородность в аккумуляции органического вещества даже в пределах однотипных ландшафтов, что может быть обусловлено микроклиматическими условиями и особенностями растительного покрова. Полученные данные подчеркивают необходимость учета пространственной дифференциации при моделировании углеродного баланса экосистем.

Анализ запасов органического углерода в метровой толще почв (0-100 см) выявил значительную межпрофильную дифференциацию, обусловленную генетическими особенностями почв. Максимальные значения зафиксированы в органогенных почвах: торфяно-эутрофные почвы (разрезы CP2, CP6, CP7, CP15) аккумулируют от 50,3 до 85,9 кг Сорг/м², с максимальным показателем в профиле CP2.

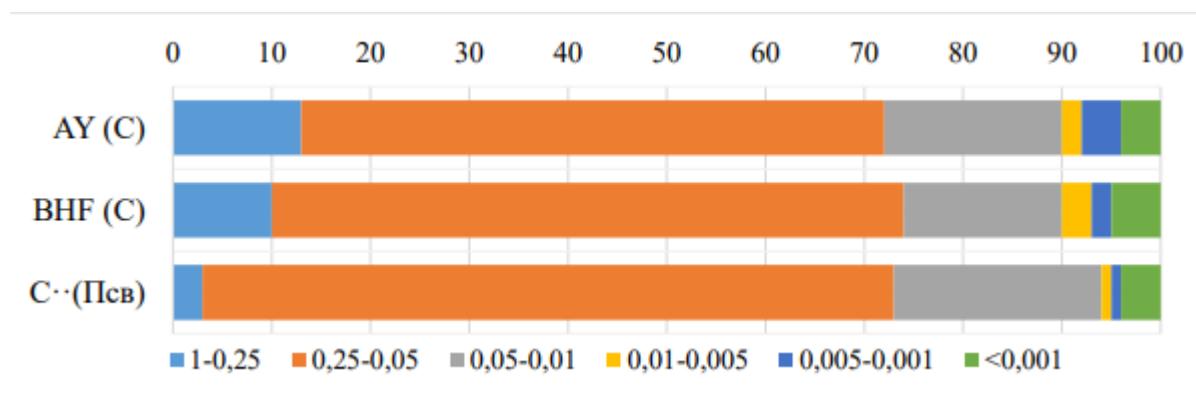
Существенно меньшие запасы характерны для ствола постлитогенных почв. Минимальное значение (8,5 кг Сорг/м²) отмечено в дерново-подбурае оподзоленном иллювиально-железистом на камовых супесях (CP1), что связано с низким содержанием органического вещества в иллювиально-железистых горизонтах и почвообразующей породе. Промежуточное положение занимает агрозём среднепахотный альфегумусовый (CP10) с запасом 17,0 кг Сорг/м².

Выявленная вариабельность обусловлена различным вкладом органогенных и постлитогенных почв в формирование углеродного пула, причем последние характеризуются минимальным содержанием органического вещества, что определяет общий низкий уровень запасов углерода в автоморфных минеральных почвах по сравнению с гидроморфными органогенными аналогами.

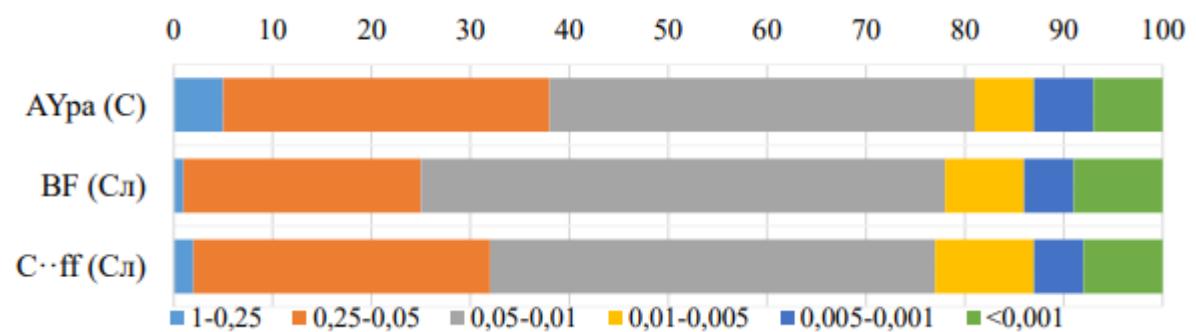
Почвообразующей породой исследуемой территории служат камовые отложения, представленные среднезернистыми песками с включением супесчаного и легкосуглинистого материала. В качестве репрезентативных объектов для анализа гранулометрического состава были отобраны профили подбров иллювиально-железистых и агрозёмов, сформировавшиеся на различных элементах ландшафта (Рисунок 13).



A



Б



В

Рисунок 13 – Профильное распределение гранулометрического состава (%) по генетическим горизонтам для некоторых из разрезов. А – СР1, Б – СР9, В – СР14. Псв – песок связанный, С – супесь, Сл – суглинок легкий

Гранулометрический состав большинства исследуемых почв характеризуется доминированием фракции крупного и среднего песка (0.25-0.05 мм), что является результатом литологической унаследованности от почвообразующих пород. Однако в распределении частиц по профилю выявлены генетически значимые закономерности.

На вершине Колтушской возвышенности установлено аномально высокое содержание пылеватой фракции (0.05-0.01 мм), что интерпретируется как индикатор интенсивного физического и химического выветривания первичных минералов в условиях хорошего дренажа.

В почвах на склонах зафиксирована аккумуляция фракции крупной пыли (0.05-0.01 мм) в иллювиальной части профиля. Данный морфологический признак свидетельствует о сопряженном протекании двух процессов: продолжающегося выветривания минеральной массы и иллювиально-аккумулятивной дифференциации почвенного профиля с миграцией тонкодисперсных частиц вниз по профилю. Указанные особенности подтверждают активную трансформацию минеральной матрицы почв и развитые процессы

внутрипрофильной миграции органоминеральных соединений в условиях промывного типа водного режима.

2.6 Прогнозирование содержания металлов и оксидов в верхнем слое почв карбонового полигона «Ладога»

2.6.1 Особенности использования машинного обучения в прогнозировании содержания тяжелых металлов в почве

Методы машинного обучения (ML) повсеместно используются в различных экологических исследованиях, предоставляя мощные инструменты для моделирования и прогнозирования экологических явлений в пространстве и времени. Несмотря на их широкое применение, интерпретируемость этих моделей остается серьезной проблемой [89]. Понимание того, как модель строит свои прогнозы, имеет решающее значение для установления доверия к ее результатам, особенно в мониторинге окружающей среды [90-91].

Потенциально токсичные элементы (ПТЭ) и тяжелые металлы (ТМ) - это природные элементы с высокой атомной массой, которые играют важную роль в здоровье почвы и функционировании экосистемы. Хотя незначительные количества ТМ необходимы для функционирования почвы, повышенные концентрации могут представлять серьезную опасность для здоровья человека и окружающей среды. Загрязнение почвы вызвано различными видами деятельности человека, включая промышленные процессы [92], добычу полезных ископаемых [93], сельское хозяйство [94] или утилизация отходов [95]. Накопление металлов в почве может нарушить рост растений, загрязнить пищевые цепочки и поставить под угрозу здоровье человека. В результате точная оценка, картирование и мониторинг уровней ПТЭ и ТМ в почве имеют решающее значение для снижения экологических рисков и обеспечения устойчивого управления земельными ресурсами.

Интерпретируемость моделей ML особенно важна при решении сложной проблемы загрязнения почв. Понимание того, какие параметры почвы и факторы окружающей среды оказывают наибольшее влияние на накопление металлов, имеет решающее значение для разработки успешных стратегий восстановления, выявления источников загрязнения и определения приоритетности регионов для дальнейшего изучения [96-97]. Данное исследование было направлено на изучение одиннадцати металлов и их оксидов с помощью комплексной системы ML. Конкретными целями данного исследования были (1) оценка взаимосвязей содержания ТМ между различными параметрами почвы, растительностью и типами землепользования, (2) прогнозирование содержания ТМ с использованием алгоритмов ML и (3) интерпретация моделей с использованием подхода SHapley Additive exPlanations (SHAP). Полученные результаты помогают разобраться в сложном

взаимодействии факторов, влияющих на содержание металлов и их оксидов в почвах. Понимая эти сложные взаимосвязи, можно получить ценную информацию о причинах загрязнения почв и разработать более эффективные стратегии мониторинга и восстановления.

Для моделирования ТМ в качестве предикторов были использованы: различные параметры почв, нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), в качестве характеристики растительности, полученной со спутниковой съемки Sentinel-2, полученный в результате уровень NDVI затем был интегрирован с другими предикторами в рамках моделирования, метод опорных векторов (SVM) с радиальной базисной функцией, данный алгоритм особенно эффективен при обработке нелинейных зависимостей и сложных шаблонов в данных, метод Cubist, который позволяет фиксировать как дискретные пороговые значения (с помощью правил), так и непрерывные взаимосвязи (с помощью линейных моделей), K-Nearest Neighbors (KNN) это алгоритм обучения на основе примеров, который предсказывает значения на основе среднего значения из k наиболее похожих обучающих примеров. В процессе ML использовался метод рекурсивного исключения признаков (RFE), чтобы упростить модель, повысить ее эффективность и, возможно, повысить ее точность, сосредоточившись на наиболее информативных признаках [98]. Метод, используемый для выбора наиболее релевантных предикторов для ML-модели путем итеративного удаления функций, которые в наименьшей степени влияют на производительность модели. После этого оценивалась важность предикторов, выбранных после RFE, используя метод перестановок. Важность перестановок в ML-модели оценивает признаки путем случайного перетасовывания его значений и наблюдения за тем, насколько снижается точность прогнозирования [99]. Также был использован метод SHAP, основанный на теории игр, он обеспечивает основу для вычисления значений Шепли и определения вклада каждой характеристики (предиктора) в прогноз ML-модели. Этот подход позволяет количественно оценить средний предельный вклад признака, рассматривая все возможные комбинации присутствующих или отсутствующих признаков. Значения Шепли позволяют понять индивидуальное влияние каждой переменной на выходные данные модели.

2.6.2 Прогнозирование содержания ТМ и оксидов металлов в почве

Сводная статистика по изученным элементам и параметрам почвы выявила значительные различия по большинству из них (Таблица 7). Наибольшие различия были обнаружены по содержанию ПОВ (102%), которое варьировалось от 1,36 до 48,6%. Среди металлов и их оксидов наблюдался значительный разброс по Fe₂O₃ (75,1%), Co (71,6%) и MnO (71%).

Таблица 7. Параметры используемые в прогнозировании содержания ТМ и оксидов металлов на территории карбонового полигона

Параметр	Размерность	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана	СКО	KB, %
pH вод	-	3,9	5,8	4,81	4,8	0,4	7,8
pH сол	-	3	5,5	4,09	4,05	0,4	9,8
ПОВ	%	1,36	48,6	18,2	5,09	18,6	102
Запасы ПОВ	кг/м ²	1,68	10,9	4,66	4,59	2,2	47,7
Плотность	г/см ³	0,13	1,38	0,748	0,96	0,5	67,7
Sr	мг/кг	43	227	152	169	51,6	33,9
Pb	мг/кг	2	149	40,9	33	27,3	66,8
As	мг/кг	5	33	12,5	10	6,7	53,4
Zn	мг/кг	8	322	66,9	55,5	46,4	69,4
Ni	мг/кг	4	46	14,6	13,5	6,4	43,7
Co	мг/кг	2	34	10,7	8	7,7	71,6
Fe ₂ O ₃	%	1,23	15,1	3,95	2,84	3,0	75,1
MnO	мг/кг	327	4778	1281	997	910	71
Cr	мг/кг	37	75	55,6	54	8,5	15,2
V	мг/кг	2	77	38,4	39,5	18,9	49,2
TiO ₂	%	0,08	0,656	0,354	0,384	0,2	48,3

Была рассчитана корреляционная зависимость Спирмена между всеми изучаемыми переменными, включая ТМ и оксиды металлов и параметры почв. Наиболее сильные взаимосвязи были обнаружены между V и TiO₂ ($r = 0,95$), Co и Fe₂O₃ ($r = 0,88$), а также между Pb и As ($r = 0,84$). Среди параметров почвы, показатель плотности имел сильную отрицательную корреляцию с содержанием ПОВ ($r = -0,96$), и положительную корреляцию с TiO₂ ($r = 0,69$), Sr ($r = 0,68$) и V ($r = 0,62$). ПОВ имело корреляцию с Sr ($r = -0,73$), TiO₂ ($r = -0,69$) и Co ($r = 0,62$).

Сравнительный анализ четырех методов ML показал, что согласно результатам валидации после 50 повторений, коэффициенты R² и МЕС варьировали от 0,07 до 0,95 и от -0,58 до 0,93 соответственно, в зависимости от целевой переменной и алгоритма ML. Представленные модели неизменно демонстрировали превосходные прогностические

возможности, в то время как KNN в целом демонстрировала низкие показатели по большинству элементов. Для таких элементов, как As, Co, Cr, Fe₂O₃, Sr, V и TiO₂, RF и Cubist показали отличную производительность при значениях R², превышающих 0,70. SVM продемонстрировал промежуточную производительность, заняв третье место после RF и Cubist, но опередив KNN. Однако все методы испытывали трудности с определенными ТМ, в частности с Zn, где ни один метод не достигал значения R² выше 0,17.

Далее представлена интерпретация моделей RF для элементов с коэффициентами R² > 0,75 (т.е. As, Co, Fe₂O₃, Sr, TiO₂ и V), предполагая достоверность результатов.

Мышьяк

На рисунке 14 показана величина вклада переменных в прогнозирование содержания As в соответствии с индивидуальными значениями SHAP. Как и в случае с анализом перестановок, ключевым фактором прогнозирования был Pb, в то время как порядок важности других переменных изменился. Также показана тенденция положительного или отрицательного вклада каждого предиктора (цветные точки). В то время как Pb вносил значительный вклад в прогнозы As, его более высокие значения приводили к увеличению уровней As (положительный вклад), и наоборот. Например, содержание ПОВ внесло средний вклад в модель, но его большие значения положительно повлияли на результаты модели.

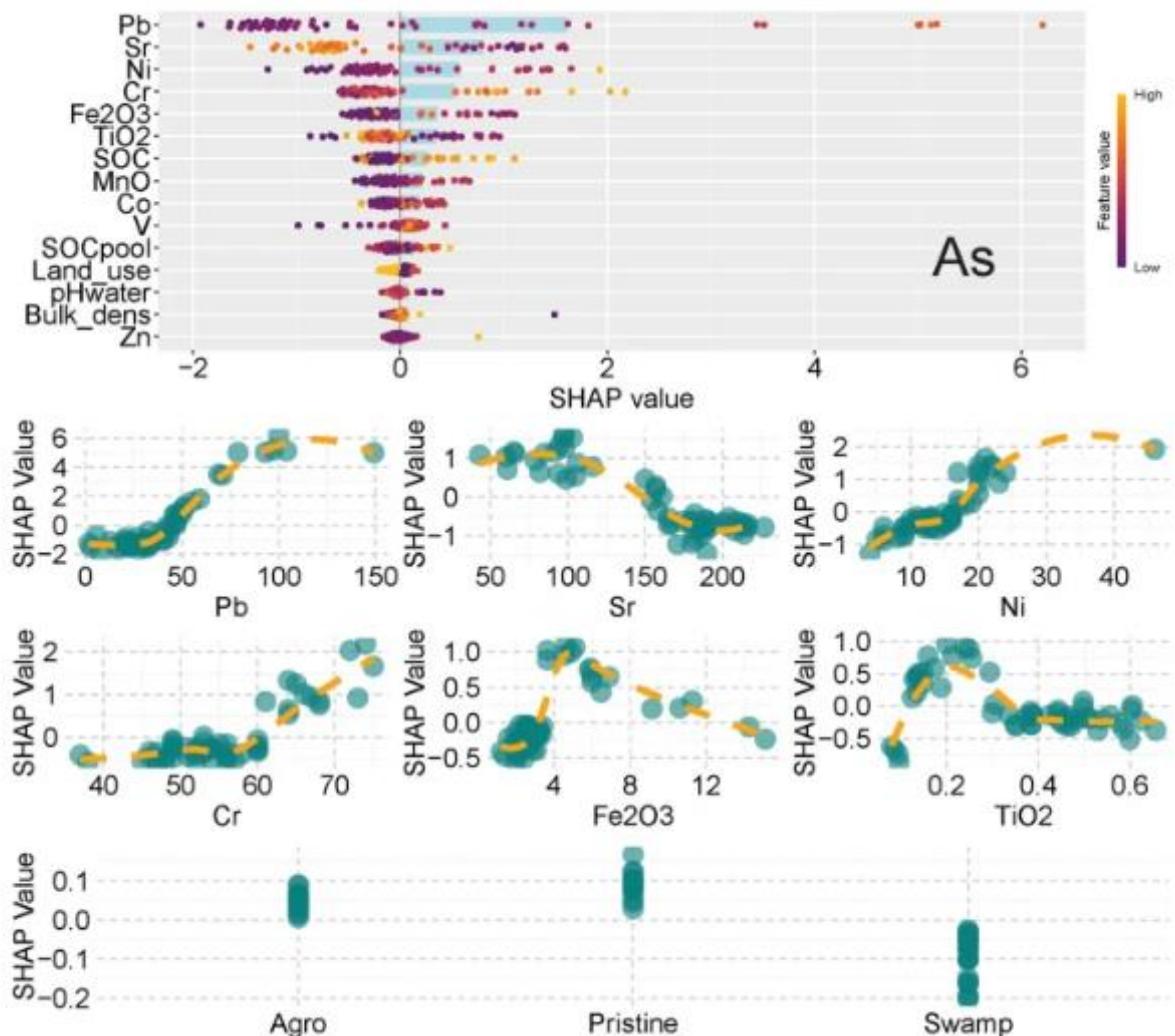


Рисунок 14 – Особенности прогнозирования содержания мышьяка (As) на основе значений SHAP (вверху), где синие столбчатые диаграммы показывают средние абсолютные значения SHAP для каждого признака в обучающем наборе данных, цветные точки - это значения SHAP в обучающем наборе данных для каждой отдельной точки (beeswarm). Цвет (оранжево-фиолетовый) представляет значение предиктора от низкого до высокого. Нижние зеленые графики показывают зависимости для наиболее важных переменных. Ось X представляет значение признака, а ось Y показывает значение SHAP, связанное с этой конкретной ковариацией.

Графики отдельных зависимостей показывают, как один предиктор влияет на предсказания целевой переменной. Здесь представлены графики для наиболее важных переменных, предполагая, что они имеют наиболее сильные и надежные связи с элементом моделирования. Согласно результатам, концентрации Pb до $\approx 40\text{-}50$ мг/кг демонстрировали отрицательный вклад, тогда как после этого порогового значения вклад становился положительным. Противоположная картина была продемонстрирована для содержания Sr,

где его значения выше ≈ 160 мг/кг имели отрицательную корреляцию с As. Содержание Ni демонстрировало относительно линейную зависимость от уровней As, т.е. когда концентрации Ni превышали $\approx 18\text{--}20$ мг/кг, значения SHAP были положительными. Аналогичная тенденция наблюдалась для Cr, где его значения выше 60 мг/кг положительно повлияли на прогноз As. Fe_2O_3 и TiO_2 имели отчетливую тенденцию, когда их значения варьировались от $\approx 3,8$ до 12 мг/кг и от $\approx 0,1$ до 0,3 мг/кг соответственно, что приводило к прогнозированию более высоких концентраций As, т.е. к положительному вкладу. Среди типов землепользования заброшенные и нетронутые почвы имели положительную корреляцию, в то время как заболоченные – отрицательную.

Кобальт

Содержание кобальта имело сильную отрицательную связь с содержанием Sr и положительную – с содержанием Fe_2O_3 . Таким образом, высокие значения Fe_2O_3 оказали сильное положительное влияние на прогноз значений Co, в то время как высокие уровни Sr (а также TiO_2) привели к отрицательному вкладу (Рисунок 15). Анализ выявил широкий спектр значений SHAP для этих элементов.

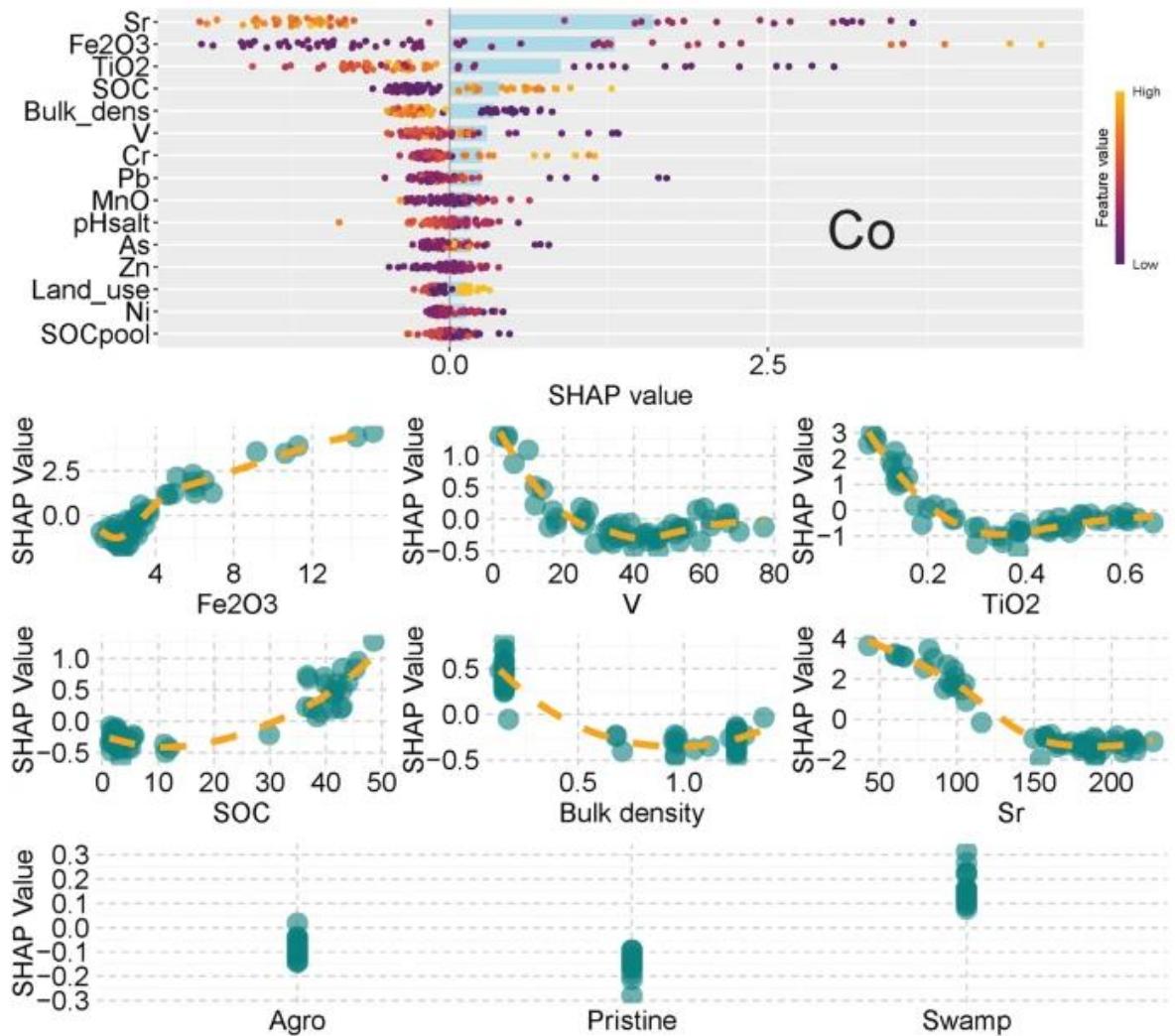


Рисунок 15 – Особенности прогнозирования кобальта на основе значений SHAP (вверху), где синие столбчатые диаграммы показывают средние абсолютные значения SHAP для каждого объекта в обучающем наборе данных, цветные точки - это значения SHAP в обучающем наборе данных для каждой отдельной точки (beeswarm). Цвет (оранжево-фиолетовый) представляет значение предиктора от низкого до высокого. Нижние зеленые графики показывают зависимости для наиболее важных переменных. Ось X представляет значение признака, а ось Y показывает значение SHAP, связанное с этой конкретной ковариацией

Графики зависимости показали линейную зависимость для Fe₂O₃, в то время как для других элементов линейная зависимость отсутствовала. Например, для V и TiO₂ линии резко снижаются до значений 18 и 0,2 мг/кг соответственно, а затем остаются на уровне плато. Здесь мы видим влияние свойств почвы: содержание кобальта изменяется при значениях ПОВ ≈ 36-37%, а плотность - при 0,2 г/см³. То есть почвы с более высоким содержанием ПОВ и меньшей плотностью приводят к прогнозированию более высоких

концентраций кобальта. Это также объясняет положительный вклад торфяных почв, поскольку они характеризуются высоким содержанием ПОВ и низкой плотностью.

Оксид железа (III) (Fe_2O_3)

Наиболее важными переменными для моделирования Fe_2O_3 были Co, Sr и TiO_2 (Рисунок 16). Среди них высокие уровни Co показали положительный вклад в прогноз, в то время как Sr и TiO_2 – отрицательный. Cr и ПОВ внесли положительный вклад, т.е. при увеличении их значений модель, как правило, предсказывала более высокие уровни железа. Это наглядно продемонстрировано на графиках частичной зависимости, где значения Sr до ≈ 100 -110 мг/кг имели положительный вклад, тогда как от 150 мг/кг и выше наблюдался отрицательный вклад. Значения SHAP для элементов Co, Cr и MnO были положительными после их значений на уровне 20, 60 и 1900 мг/кг, соответственно. Типы землепользования также четко показали свой вклад в прогнозы по содержанию железа. Заброшенные и нетронутые почвы позволяют прогнозировать более низкие уровни Fe_2O_3 , в то время как торфяники – самые высокие.

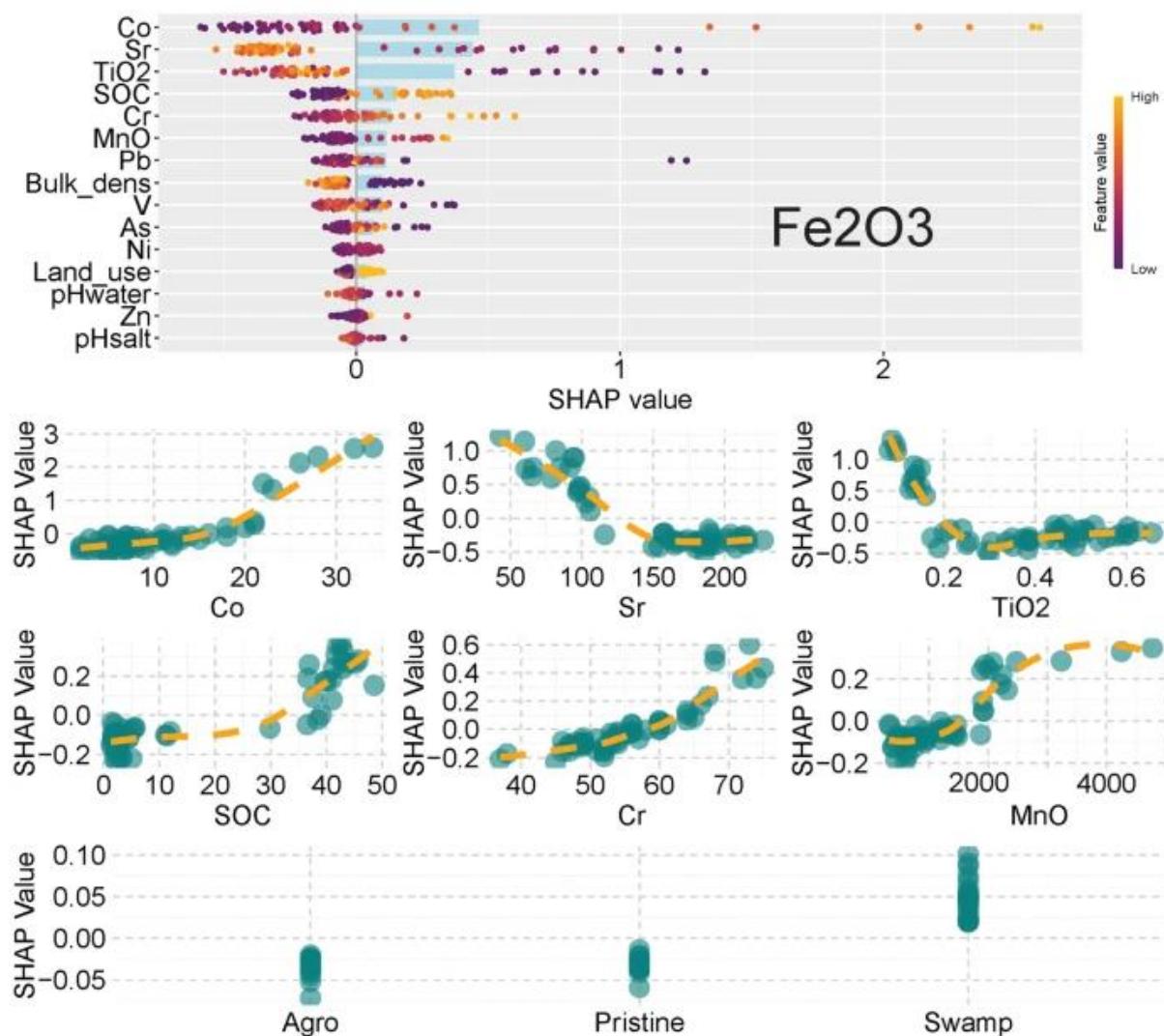


Рисунок 16 – Особенности прогнозирования оксида железа (III) (Fe_2O_3) на основе значений SHAP (вверху), где синие столбчатые диаграммы показывают средние абсолютные значения SHAP для каждого признака в обучающем наборе данных, цветные точки - это значения SHAP в обучающем наборе данных для каждой отдельной точки (beeswarm). Цвет (оранжево-фиолетовый) отображает значение предиктора от низкого до высокого. Нижние зеленые графики показывают зависимости для наиболее важных переменных. Ось X представляет значение признака, а ось Y показывает значение SHAP, связанное с этой конкретной ковариацией

Стронций

В модели Sr наибольший средний вклад продемонстрировали Fe_2O_3 , Со и ПОВ, при этом значения SHAP варьировались от -22 до 16 мг/кг, -24 и 13 мг/кг и от -15 до 7% соответственно (Рисунок 17). Наибольшие уровни этих прогностических факторов показали отрицательную корреляцию, почвы с повышенными концентрациями Sr показали пониженные уровни Fe_2O_3 , Со и ПОВ. Среди других важных свойств, низкие значения TiO_2 и плотности негативно повлияли на прогноз.

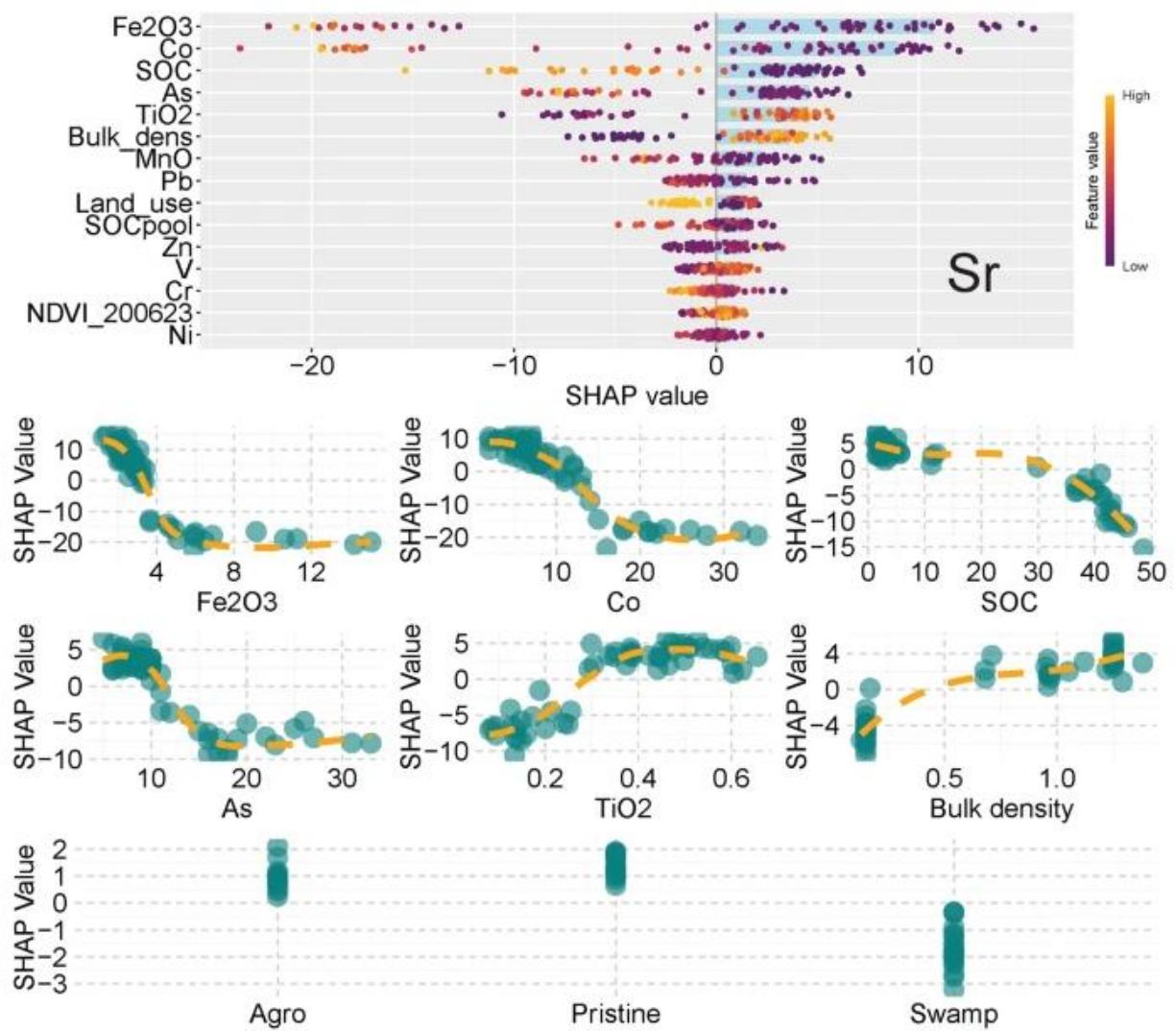


Рисунок 17 – Особенности прогнозирования стронция на основе значений SHAP (вверху), где синие столбчатые диаграммы показывают средние абсолютные значения SHAP для каждого объекта в обучающем наборе данных, цветные точки - это значения SHAP в обучающем наборе данных для каждой отдельной точки (beeswarm). Цвет (оранжево-фиолетовый) отображает значение предиктора от низкого до высокого. Нижние зеленые графики показывают зависимости для наиболее важных переменных. Ось X представляет значение признака, а ось У показывает значение SHAP, связанное с этой конкретной ковариацией

Графики зависимости показывают, что значения Fe_2O_3 до 3-4% положительно коррелируют с Sr, но затем обнаруживают отрицательную корреляцию. Аналогичная тенденция наблюдается для Со и As, пороговые значения были обнаружены на уровне 10-12 мг/кг для обоих. Почва с относительно низкими значениями ПОВ (до 13%) привела к прогнозированию более высоких концентраций Sr. Об этом также свидетельствовало сильное негативное влияние торфяников на прогнозы при значениях SHAP до -3 мг/кг.

Оксид титана

Основными факторами, влияющими на содержание TiO_2 , были ванадий, железо и стронций (Рисунок 18). V и Fe_2O_3 имели большой разброс значений SHAP (от $-0,075$ до $0,08\%$ и от $-0,05$ до $0,04\%$, соответственно) с положительными и отрицательными зависимостями соответственно. Высокие значения Sr также продемонстрировали большую величину положительного вклада в прогноз TiO_2 .

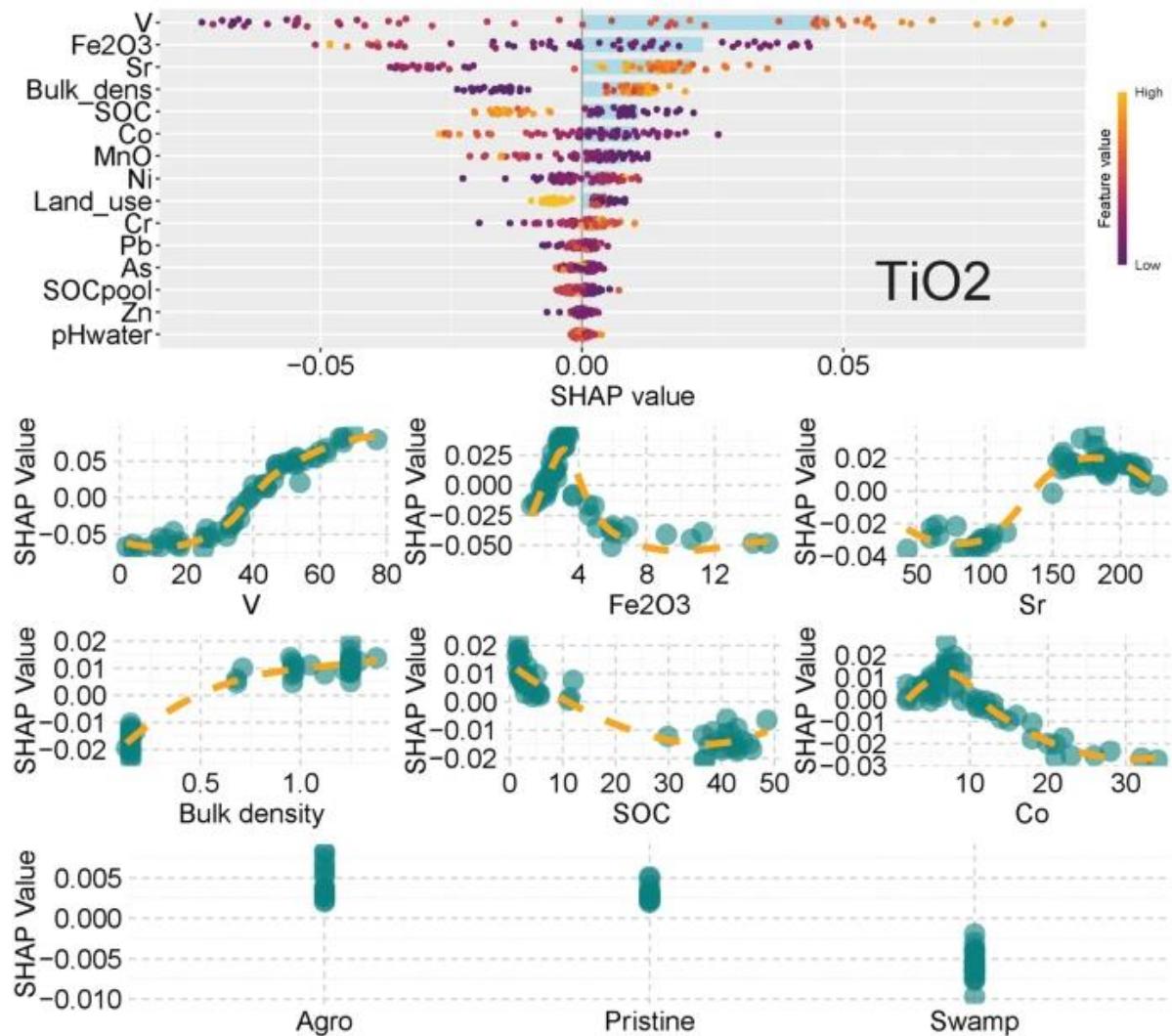


Рисунок 18 – Особенности прогнозирования оксида титана на основе значений SHAP (вверху), где синие столбчатые диаграммы показывают средние абсолютные значения SHAP для каждого признака в обучающем наборе данных, цветные точки - это значения SHAP в обучающем наборе данных для каждой отдельной точки (beeswarm). Цвет (оранжево-фиолетовый) отображает значение предиктора от низкого до высокого. Нижние зеленые графики показывают зависимости для наиболее важных переменных. Ось X представляет значение признака, а ось Y показывает значение SHAP, связанное с этой конкретной ковариацией

Графики зависимости показали, что при значениях ванадия до 40 мг/кг и стронция до 120 мг/кг наблюдался отрицательный вклад, а после этого был выявлен положительный вклад. Для железа и кобальта наблюдалась аналогичная картина, когда пики положительных значений SHAP не соответствовали их самым низким или самым высоким значениям. Значения SHAP также различались по типам землепользования: положительный вклад вносили заброшенные и нетронутые почвы, а отрицательный - торфяники.

Ванадий

Как и при использовании метода перестановок, TiO_2 оказал значительное влияние на прогноз V (Рисунок 19). Его значения SHAP варьировались от 10 до 12,5 мг/кг с положительным вкладом его самых высоких значений. Самые высокие значения Sr, плотности и Ni были ответственны за прогнозирование более высоких уровней V. Хотя ПОВ и Со имели средний вклад в модель, они явно имели отрицательную корреляцию.

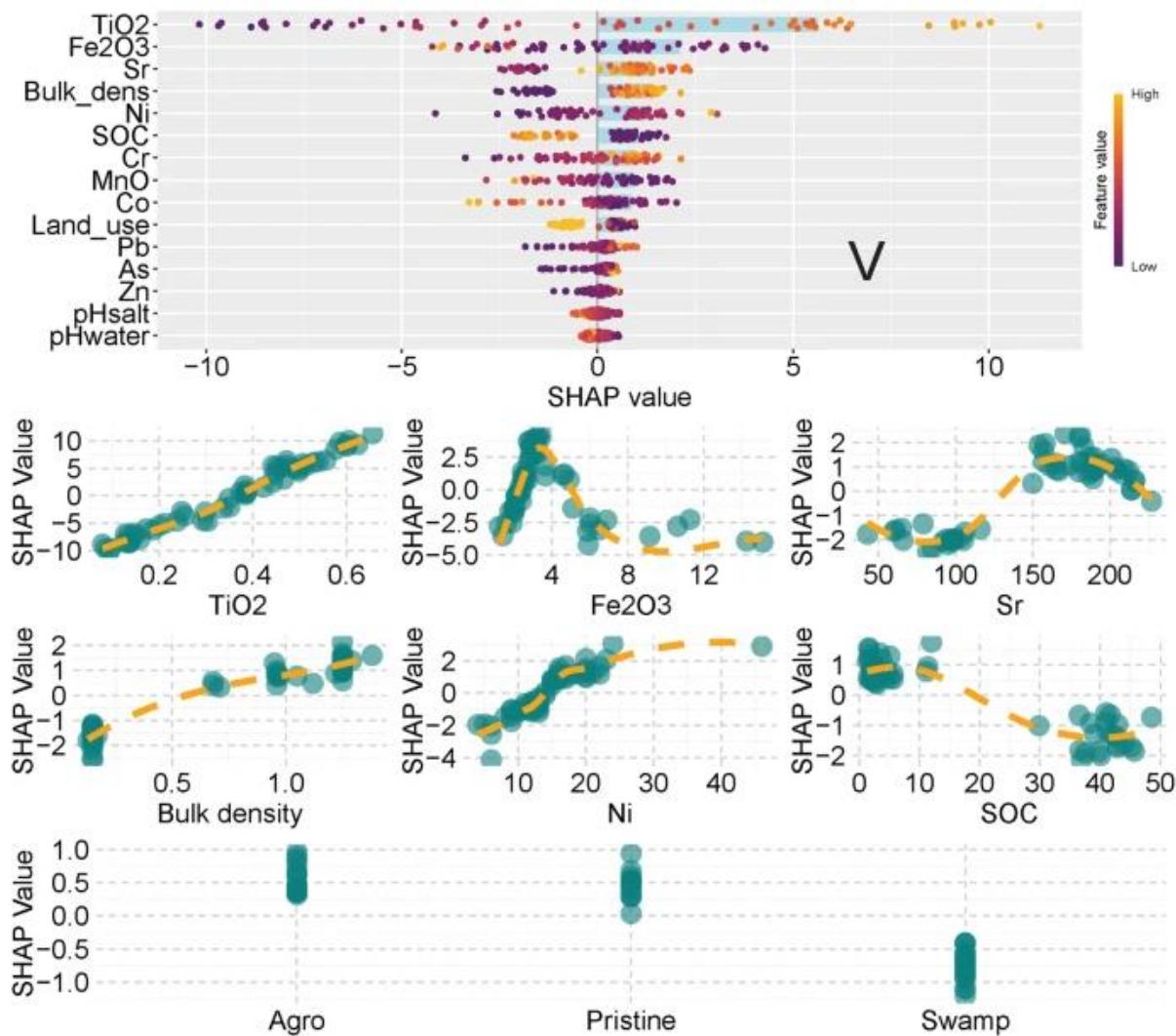


Рисунок 19 – Особенности прогнозирования ванадия на основе значений SHAP (вверху), где синие столбчатые диаграммы показывают средние абсолютные значения SHAP для каждого признака в обучающем наборе данных, цветные точки - это значения SHAP в обучающем наборе данных для каждой отдельной точки (beeswarm). Цвет (оранжево-фиолетовый) представляет значение предиктора от низкого до высокого. Нижние зеленые графики показывают зависимости для наиболее важных переменных. Ось x представляет значение признака, а ось у показывает значение SHAP, связанное с этой конкретной ковариацией

Содержание железа до 2-2,5% оказывало отрицательное влияние на прогноз. Затем, до концентрации 5%, оно было положительным, а затем снова отрицательным. Кривые для TiO₂, Sr, плотности и Ni были схожими, где их самые высокие значения были связаны с высоким содержанием ванадия. Для ПОВ картина была противоположной, что объясняло отрицательный вклад торфяников. Бывшие сельскохозяйственные угодья и нетронутые почвы, как правило, предсказывали самые высокие уровни ванадия.

Таким образом, сильные корреляции, наблюдаемые между некоторыми металлами и их оксидами, указывают на их общее происхождение или схожие геохимические процессы, влияющие на их присутствие. Это означает, что знание концентрации одного элемента может дать четкое представление о концентрациях других. В результате это объясняет высокую точность прогнозирования прогностических моделей для большинства элементов.

Применение метода SHAP позволило глубже понять индивидуальные предикторы различных геохимических элементов. Этот метод выявил четкую иерархию влияния, при которой определенные элементы вносят значительный положительный или отрицательный вклад в прогнозируемые концентрации других элементов. Значительный положительный вклад одних элементов позволяет предположить, что они служат надежными индикаторами присутствия других, в то время как отрицательный вклад указывает на потенциальные антагонистические отношения или конкурентное взаимодействие при их накоплении или транспортировке. Это было четко продемонстрировано в большинстве прогнозирующих моделей. Например, в модели, предсказывающей содержание TiO₂, ванадия и ПОВ оказались ключевыми факторами, оказывающими противоположное влияние. Ванадий продемонстрировал сильную положительную корреляцию с TiO₂, что указывает на положительное влияние на его концентрацию, в то время как ПОВ продемонстрировал сильную отрицательную корреляцию, предполагающую обратную зависимость.

Было отмечено, что элементы вносят значительный вклад в прогнозируемые концентрации других элементов только тогда, когда их собственные концентрации

превышают определенные пороговые значения. Этот пороговый эффект предполагает, что после определенного момента влияние содержания исследуемых элементов на другие элементы значительно усиливается, либо усиливая, либо подавляя их присутствие. Используя тот же пример, что и с TiO_2 , его модель предсказала более высокие значения, когда уровень ванадия превышал 40 мг/кг, а содержание ПОВ не превышало 12%. Это открытие подчеркивает важность учета не только присутствия элемента, но и его концентрации при оценке его влияния на общий геохимический ландшафт.

Ведущим геохимическим процессом является нисходящая миграция водорастворимых и кислоторастворимых соединений в почвах, а именно оксидов железа и алюминия. Удаление происходит в основном из горизонта E, в то время как накопление происходит в нижележащих горизонтах Bt/Bs. Удаление органоминеральных компонентов почвы приводит к снижению плотности верхних горизонтов. Таким образом, удаление мельчайших крупинок минералов (пыли, глины) происходит за счет движения почвенных вод вниз и увеличения подвижности металлов в условиях повышенной кислотности. Зерна кварца различного размера остаются в горизонте E, который устойчив к химическим и физическим изменениям. Миграция металлов происходит вместе с комплексами органических соединений и оксидами железа и алюминия, что может быть отражено в высоком соотношении между Fe_2O_3 и различными ТМ. Почвы переувлажненных территорий также характеризуются повышенной кислотностью, что может привести к увеличению подвижности металлов, однако из-за застойного типа водного режима эти металлы с меньшей вероятностью мигрируют относительно подзолов. В торфяных почвах они могут быть обнаружены в виде стабильных органоминеральных комплексов.

В большинстве случаев минеральные почвы и торфяники продемонстрировали заметный вклад в модели, что объясняется их различным содержанием в этих типах землепользования. Торфяники считаются переходным элементом в системе дренированных и переувлажненных участков, что приводит к специфическим био- и геохимическим процессам [100]. В заболоченных и кислых условиях медленные темпы разложения на торфяниках приводят к накоплению органического вещества, которое связывает элементы. Например, ПОВ обычно содержит большое количество минерального материала и связанных с ним гидроксидов железа [101]. Такие образующиеся комплексы эффективно иммобилизуют элементы и предотвращают их вымывание в окружающие экосистемы. Кроме того, кислотность торфяников способствует образованию нерастворимых сульфидов металлов, что еще больше снижает их подвижность [102]. И наоборот, минеральные почвы с их более быстрыми темпами разложения способствуют большей подвижности и миграции ТМ.

Несмотря на то, что выводы, полученные в результате анализа значений SHAP, и наблюдаемые корреляции между элементами являются многообещающими, крайне важно проявлять осторожность при интерпретации этих результатов. Во-первых, мы провели анализ на относительно небольшом наборе данных, состоящем из 56 образцов, что может ограничить возможность обобщения результатов в более широком контексте. Наблюдаемые взаимосвязи между элементами могут быть специфичными для конкретной геологической обстановки и условий, представленных в этом наборе данных. Во-вторых, анализ был сосредоточен на определенном наборе предикторов, и включение дополнительных переменных или более обширного набора данных потенциально могло бы выявить другие или более сложные взаимосвязи. Кроме того, установленные пороговые значения для вкладов элементов необходимо проверить на более крупных наборах данных и в разных географических точках, чтобы оценить их надежность и применимость. Наконец, важно помнить, что модели ML - это инструменты для выявления закономерностей и взаимосвязей в данных. Несмотря на то, что они могут дать ценную информацию, не следует полагаться исключительно на них для получения окончательных выводов о геохимических процессах. Всестороннее понимание лежащих в основе геологических процессов в сочетании со строгой проверкой в полевых условиях имеет решающее значение для обеспечения надежной интерпретации результатов ML.

2.7 Прямые измерения эмиссии CO₂ почвами карбонового полигона Ладога

Антropогенное влияние на изменение климата непосредственно связано с ростом концентраций климатически активных газов в атмосфере, прежде всего диоксида углерода и метана. Динамика содержания CO₂ определяется сложными процессами газообмена между основными резервуарами углерода - атмосферой, континентальными экосистемами, гидросферой и литосферой, а также биохимическими процессами, где CO₂ выступает конечным продуктом трансформации.

Особую значимость в глобальном углеродном цикле имеют экосистемы холодной умеренно-влажной зоны восточной Европы (Скандинавия, Россия), характеризующиеся исключительно высоким секвестрационным потенциалом - до 208 тC/га. Территория Северо-Запада России демонстрирует наиболее интенсивный рост среднегодовых температур в стране, что создает риски трансформации экосистем и дестабилизации почвенного органического вещества. Усиление процессов минерализации органического вещества в условиях потепления может привести к значительному увеличению эмиссии климатически активных газов и формированию положительной обратной связи в системе "климат-углерод". Данный регион поэтому требует особого внимания при разработке

стратегий адаптации и мониторинга углеродного баланса. Анализ эмиссии углекислого газа проводили на портативном газовом анализаторе «ПИА» («НПФ МЭМС», Россия).

Полученные значения потоков CO₂ показали относительно низкий поток углекислого газа из почв карбонового полигона, что обусловлено наступлением осени и понижением температуры атмосферного воздуха. Несмотря на это, выявленные различия четко отражают влияние типа экосистемы на поток CO₂ из почвы. Наименьшая эмиссия зафиксирована на заболоченной территории, где развиваются торфяно-эутрофные почвы (CP2) (0,03 мгCO₂/м²/час), что объясняется постоянным переувлажнением и анаэробными условиями, которые замедляют микробиологические процессы в почве. На дренированной позиции, где развиваются подзолы иллювиально-железистые, был отмечен также относительно низкий поток углекислого газа из почвы 0,15 мгCO₂/м²/час, но выше чем с заболоченной территорией, хороший дренаж, аэробные условия и наличие легкодоступных растительных остатков приводят к увеличению эмиссии углекислого газа из почвы. Однако, наибольшая эмиссия отмечена из почв залежных земель – 0,23 мгCO₂/м²/час, что, обусловлено бывшим сельскохозяйственным использованием территории и активной деструкцией органических остатков в почве. Таким образом, антропогенно-преобразованные почвы могут демонстрировать более высокий уровень эмиссии углекислого газа, в то время как заболоченные экосистемы выступают в роли наиболее инертных резервуаров углерода, где происходит консервация органического вещества в виде слаборазложившихся растительных остатков.

3 Картографирование и моделирование запасов почвенного органического вещества на территории объединенного карбонового полигона «Ладога»

3.1 Картографирование запасов почвенного органического вещества по данным дистанционного зондирования Земли с использованием гибридного метода

Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) утвердились в качестве ключевого инструмента цифрового почвенного картографирования и оценки углеродного пулла. Критически важные преимущества ДДЗ включают пространственно-непрерывный охват, временную повторяемость наблюдений и оперативность получения информации на обширных территориях в разнообразных ландшафтных условиях. Многочисленные исследования [103-108] подтвердили эффективность применения ДДЗ для пространственного моделирования содержания углерода, распределения органического вещества и расчета его запасов в различных типах экосистем. Особый практический интерес представляет использование материалов мультиспектральной съемки спутника

Sentinel-2A, обеспечивающего получение изображений высокого пространственного разрешения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, что создает фундамент для разработки точных регрессионных моделей оценки параметров почвенного покрова.

Для пространственного моделирования запасов углерода был использован спутниковый снимок Sentinel-2A, временная синхронизация которого с проведением полевых исследований обеспечивает репрезентативность корреляционного анализа. Мультиспектральный сенсор указанной платформы регистрирует данные в тринадцати спектральных каналах, охватывающих диапазоны от видимого (VIS) до ближнего (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) излучения. Такой спектральный охват создает основу для выявления эмпирических зависимостей между оптическими характеристиками подстилающей поверхности и фактическими показателями запасов углерода, измеренными в ходе наземных исследований. В рамках картирования были использованы различные методы машинного обучения – регрессионный крикинг (PK), random forest (RF), random forest ordinary kriging (RFOK).

На основе лабораторных анализов содержания органического углерода (Сорг) в образцах почв были рассчитаны его запасы в слое 0–10 см для каждой точки отбора. Согласно полученным данным (Таблица 8), была выявлена значительная вариация значений запасов ПОВ от минимальных 0,6 до максимальных 10,9 кг/м² при среднем значении 4,7 кг/м². Высокая пространственная изменчивость запасов углерода подтверждается величиной стандартного отклонения, составляющей 2,3 кг/м², что свидетельствует о существенной неоднородности распределения органического вещества в почвенном покрове изучаемой территории.

Таблица 8. Статистические значения, используемые для картографирования запасов ПОВ. Анализ проведен среди 61 образца почв (n=61) на глубине (0-10 см).

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	Медиана	SD	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Запасы ПОВ, кг/м ²	0,6	10,9	4,7	4,7	2,3	0,4	-0,4

Для пространственного моделирования запасов углерода была разработана регрессионная модель, включающая спектральные каналы Sentinel-2A и производные спектральные индексы: BI2 (Brightness Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), GRVI (Green Ratio Vegetation Index), LSWI (Land Surface Water Index) и

RI (Redness Index). Методом ступенчатого отбора определено оптимальное сочетание восьми предикторов, объясняющих 53% общей вариации целевой переменной. Статистическая значимость полученной модели подтверждена на уровне $p<0.05$, что свидетельствует о адекватности выбранных параметров для прогнозирования пространственного распределения запасов ПОВ. Комбинация спектральных каналов и вегетационных индексов позволила учесть комплекс факторов, влияющих на аккумуляцию углерода, включая особенности растительного покрова, увлажненность территории и почвенные характеристики.

Анализ пространственного распределения запасов углерода, выполненный с применением трех методов картографирования с разрешением 10 м (Рисунок 20), выявил общую закономерность возрастания значений в направлении с запада на восток, коррелирующую с увеличением доли гидроморфных ландшафтов. Однако сравнительная оценка методов демонстрирует существенные расхождения в точности прогнозирования.

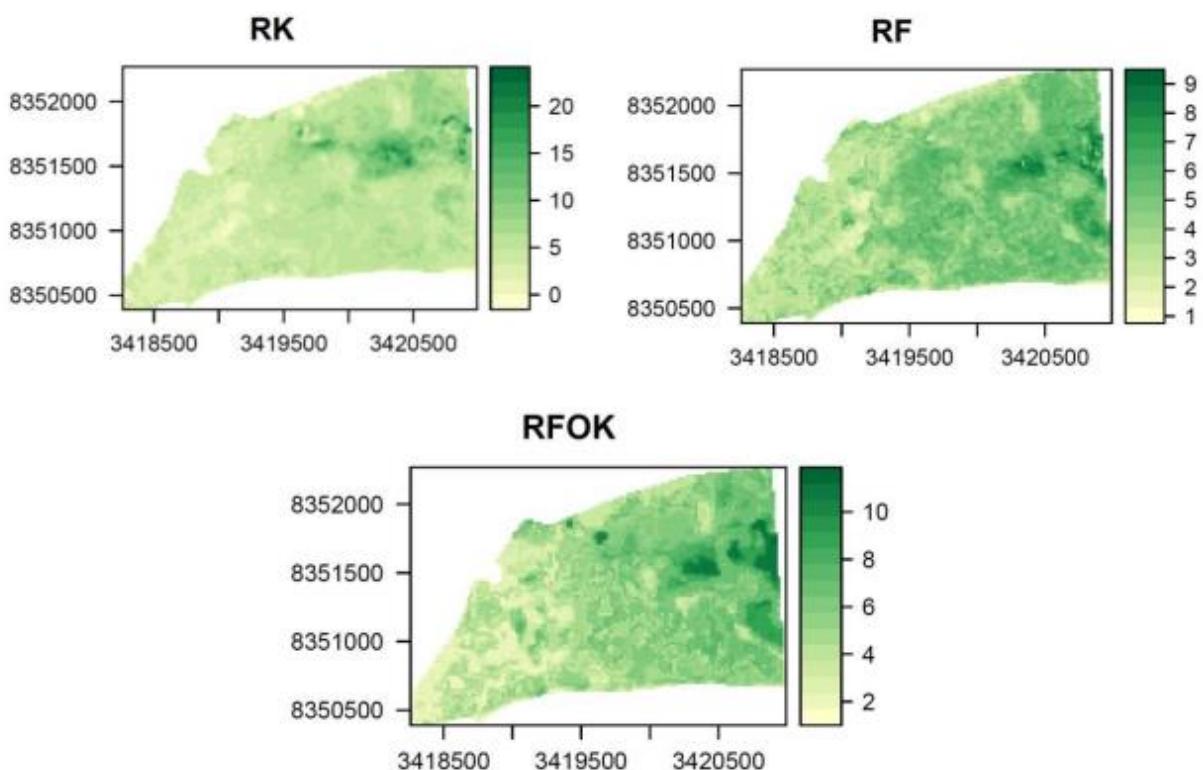


Рисунок 20 – Сгенерированы карты запасов углерода в слое 0-10 см ($\text{кг}/\text{м}^2$) с использованием различных методов

Модель на основе регрессионного кrigинга (PK) показала статистически необоснованное завышение показателей в восточной части полигона с максимальными значениями до $22,6 \text{ кг}/\text{м}^2$, что превышает лабораторные показатели более чем в 2 раза.

Напротив, карты, построенные с использованием регрессионного анализа и машинного обучения (RFOK), демонстрируют более реалистичное распределение запасов углерода в диапазоне 0,6-10,9 кг/м², что соответствует лабораторным данным. Сравнительный анализ подтвердил, что гибридные методы, сочетающие спектральные показатели и наземные измерения, обеспечивают более адекватное картографирование углеродного пулла в гетерогенных ландшафтах.

Анализ возможностей дистанционной оценки содержания ПОВ выявляет существенную зависимость точности прогнозирования от типа растительного покрова. На открытых участках спектральные сигнатуры почв демонстрируют прямую корреляцию с содержанием углерода, азота и гранулометрическим составом [109-111].

В лесных экосистемах задача существенно усложняется из-за эффекта маскировки почвенного сигнала растительным пологом. Плотный растительный покров фильтрует и трансформирует спектральные характеристики подстилающей поверхности, затрудняя выделение диагностических признаков, связанных с углеродом. Однако на региональном и глобальном уровнях растительность приобретает роль интегрального индикатора почвенных условий: характеристики фитомассы и продуктивности экосистем коррелируют с потенциалом секвестрации углерода [112].

Таким образом, выбор стратегии дистанционного картографирования углерода должен учитывать ландшафтную структуру территории: для открытых пространств эффективны методы прямого спектрального анализа, тогда как для лесных массивов необходимы комплексные подходы, учитывающие взаимосвязь между растительностью и почвенными процессами.

3.2 Моделирование запасов ПОВ на основе модели ROMUL

Почвы лесных и сельскохозяйственных угодий Карельского перешейка характеризуются значительным потенциалом сохранения пулов ПОВ, что обусловлено сочетанием относительно высокого исходного содержания органического вещества и благоприятных почвенно-климатических условий [19, 113-114]. В органо-минеральных почвах в одном метре запасы углерода демонстрируют значительную вариабельность: в подзолах иллювиально-железистых (без учета подстилки) запас составляет 34,6 кг/м², в дерново-подзолистых почвах - 54,7 кг/м². Для подзолов центральной и северной частей Карельского перешейка установлен диапазон запасов ПОВ от 34,6 до 68,1 кг/м². Наименьшие показатели характерны для постагренических почв центральной и южной частей территории, где запасы углерода варьируют от 8,41 до 11,96 кг/м². Максимальные значения зафиксированы в торфяных почвах — до 108,8 кг/м² в слое 0-100 см.

Почвенное органическое вещество выполняет критически важную функцию в глобальном углеродном цикле, обеспечивая долгосрочную секвестрацию значительных объёмов углерода, предотвращая его эмиссию в атмосферу в форме CO₂ [114-115]. Для моделирования динамики трансформации органического вещества в почвах была применена математическая модель ROMUL [21], алгоритмы которой основаны на параметризации скоростей деструкции растительного опада в зависимости от его биохимического состава.

Для проведения моделирования был сформирован комплекс входных параметров, включающий физико-химические характеристики почв (кислотно-основные свойства, плотность сложения) и показатели элементного состава (содержание углерода и азота). Модель ROMUL (Рисунок 21) позволяет прогнозировать динамику органического вещества на основе математического описания процессов трансформации различных фракций опада с учётом лимитирующего влияния азота на скорость их разложения.

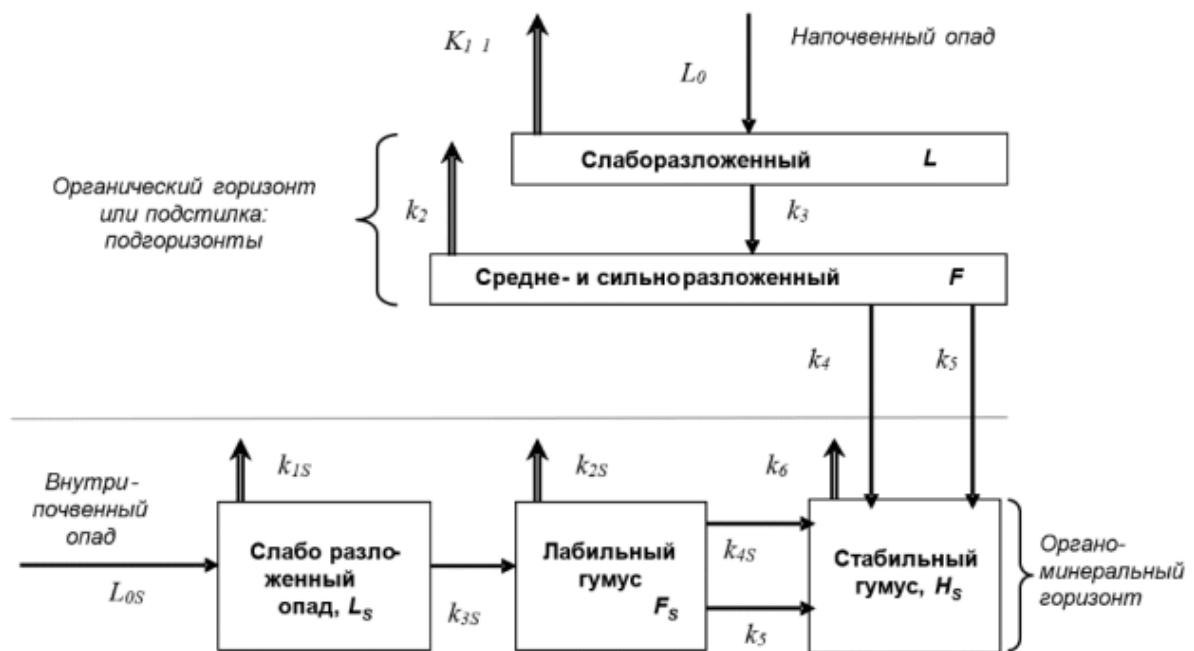


Рисунок 21 – Блок-схема модели ROMUL. Индексы на стрелках – коэффициенты гумификации (тонкие сплошные стрелки) и минерализации (широкие вертикальные стрелки) ПОВ [22]. Лабильный гумус – комплекс гумусовых веществ с растительными остатками (детрит). Индексы L и S обозначают процессы, идущие в подстилке (L – litter) и минеральной части почвы (S – soil)

Для моделирования были применены два базовых сценария — климатический и почвенный [22]. Климатический сценарий сформирован на основе непрерывного

мониторинга температурного режима, осуществляемого с помощью сети термохронов, установленных на территории карбонового полигона с 2022 года, с дополнением метеорологическими данными о температуре приземного слоя атмосферы (Таблица 9). Такой комплексный подход обеспечивает репрезентативность входных климатических параметров, необходимых для моделирования процессов трансформации органического вещества в почвах.

Таблица 9. Температурные параметры для территории карбонового полигона «Ладога»

Год	Месяц	T, °C
2022	Ноябрь	-5,4
2022	Декабрь	-4,7
2023	Январь	-3,4
2023	Февраль	-4,0
2023	Март	-1,3
2023	Апрель	5,9
2023	Май	11,2
2023	Июнь	15,8
2023	Июль	17,0
2023	Август	18,2
2023	Сентябрь	14,8
2023	Октябрь	3,6
2023	Ноябрь	4,6
2023	Декабрь	-4,4
2024	Январь	-8,9
2024	Февраль	-3,7
2024	Март	2,6
2024	Апрель	5,7
2024	Май	13,3
2024	Июнь	18,8
2024	Август	22,1
2024	Сентябрь	21,3
2024	Октябрь	10,3
2024	Ноябрь	3,4
2024	Декабрь	-1,7
2025	Январь	-1,8
2025	Февраль	-3,5
2025	Март	5,3
2025	Апрель	9,1
2025	Май	13,2
2025	Июнь	18,2
2025	Июль	24,7
2025	Август	19,5

Физико-химические параметры, используемые в почвенных сценариях представлены в Таблице 10.

Таблица 10. Физико-химические параметры СР1 – подзол иллювиально-железистый; СР2 – торфяная почва

Почва	Горизонт	Мощность, см	рН H ₂ O	d, г/см ³	Базальное дыхание, мг CO ₂ *100г ⁻¹ *24ч ⁻¹	C, %	N, %	C/N	Запас, кг/м ²	
									Углерода	Азота
СР1	O	2	5,9	0,8	45,4	7,54	0,43	20,5	1,16	0,07
	AYe	11	5,6	0,9	32,8	3,33	0,21	18,6	3,52	0,22
	BF	21	5,9	1,5	31,5	0,62	0,06	12,1	1,99	0,19
	BC	11	5,9	1,4	24,7	0,19	0,03	7,4	0,29	0,05
	C	34	6,0	1,6	23,8	0,17	0,03	6,6	0,95	0,15
СР2	TE1	10	5,2	0,2	223,7	38,40	2,20	20,4	6,53	0,37
	TE2	10	5,3	0,3	187,3	41,96	2,83	17,3	12,59	0,85
	TE3	10	4,7	0,2	141,5	46,35	2,67	20,3	7,88	0,45
	TE4	10	4,1	0,2	116,0	43,81	1,91	26,6	7,45	0,32
	TT	10	3,7	0,2	101,4	40,49	1,69	28	8,50	0,36

Параметры поступления растительных остатков в почву приведены в Таблице 11. Древостой характеризуется формулой 5Б5С, что свидетельствует о равном соотношении участия берёзы и сосны в составе насаждения. Таксационные показатели деревьев демонстрируют: для сосны диаметр ствола варьирует от 14 до 58 см при высоте 20–21 м, для берёзы диаметр составляет 32–61 см при высоте 18–20 м. Сомкнутость полога равна 0,7, что указывает на достаточно высокую плотность древесного яруса и определяет значительный объём ежегодного опада, учитываемый в модели ROMUL в качестве одного из ключевых входных параметров, влияющих на интенсивность потока углерода в почву.

Таблица 11. Общее количество фракций опада для березово-сосняка рябинового

Фракции	Количество опада, г/10м
Сосна	
Почекные чешуи	52,15
Бутоны	1,56
Пыльники	85,02
Завязи	4,42
Семена	0,15
Крылатки	0,4
Шишки	98,2
Хвоя	1456,5
Кора	236,4
Ветки	52,6
Побеги	34,2
Общее количество опада сосны	2021,6

Береза	
Почечные чешуи	15,3
Бутоны	4,85
Цветы	16,87
Прошлогодние семена	0,9
Семена	61,7
Плодоножки	0,63
Листья	852,3
Кора	8,9
Ветки	78,9
Побеги	4,1
Общее количество опада березы	1044,45
Рябина	
Листья	7,2
Ветки	0,9
Общая масса опада рябины	8,1

Помимо количественных показателей поступления растительных остатков для моделирования динамики содержания органического вещества имеет биохимическая характеристика опада, в частности, содержание азота и зольных элементов (Таблица 12). Содержание азота выступает ключевым регулятором скорости деструкции органического материала, в то время как зольность отражает содержание минеральных компонентов, влияющих на процессы гумификации. Эти параметры определяют степень лабильности органического вещества и его последующую трансформацию в составе ПОВ.

Таблица 12. Качественная характеристика растительного опада

Когорта опада	Хвоя	Кора, ветки	Корни «надземные»	Корни «подземные»
Зола, %	1,36	0,74	0,88	0,88
Азот общий, % без обогащения	0,63	0,41	0,41	0,41
Азот общий %, с обогащением	0,90	0,50	0,50	0,50

Результаты моделирования динамики почвенного органического вещества выявили двухфазный характер его трансформации: первоначальное накопление углерода в составе лесной подстилки (30 лет), который в дальнейшем сменяется формированием пула углерода в составе гумуса (100 лет), в результате гумификации растительных остатков. На промежуточном этапе (60 лет) формируется лабильный пул углерода, подверженный

частичной минерализации, тогда как к столетнему рубежу органическое вещество переходит в стабильную форму (Рисунок 22).

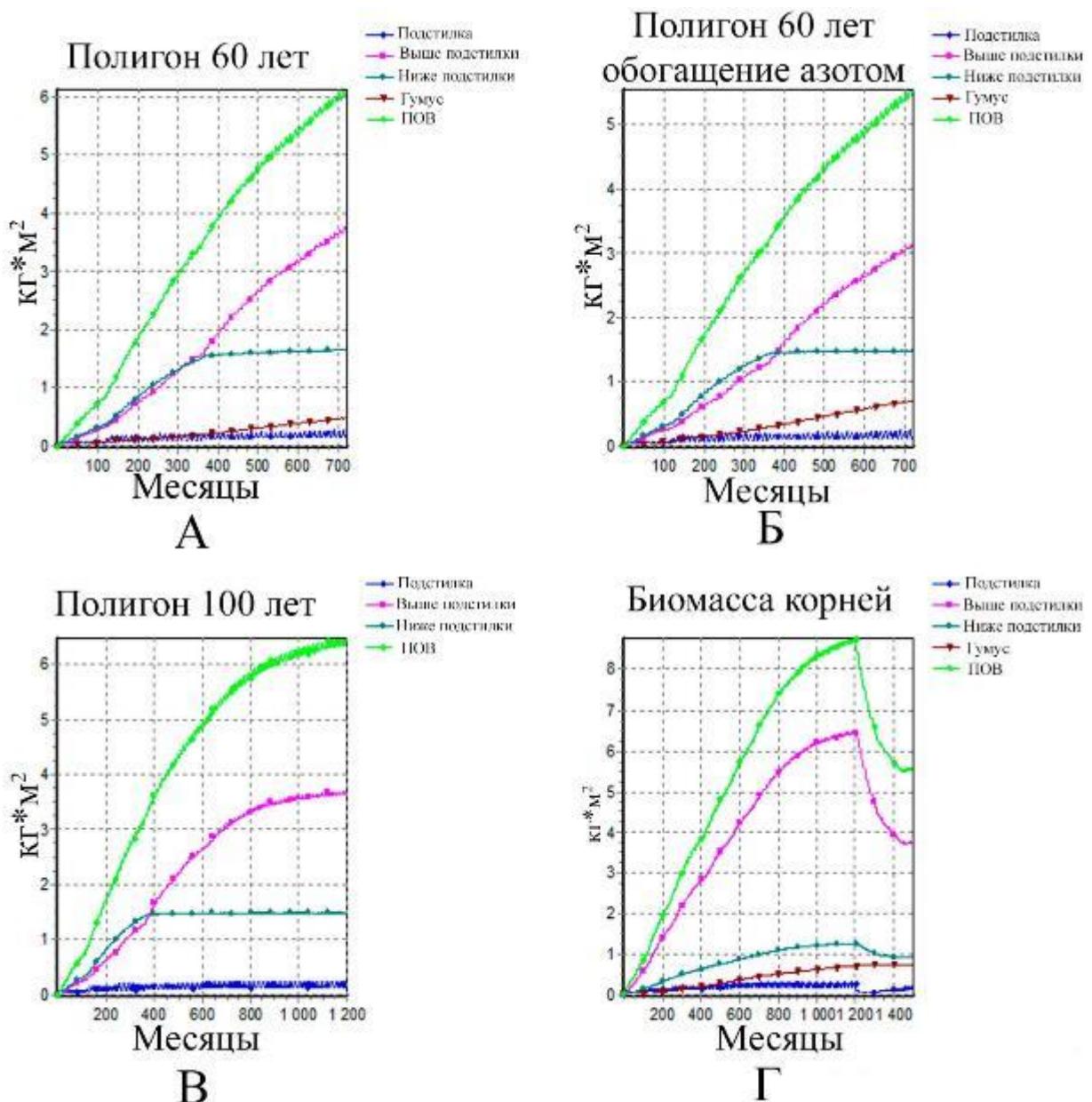


Рисунок 22 – Динамика запасов органического вещества в почвах карбонового полигона «Ладога»

Для повышения точности моделирования в перспективе предполагается интеграция дополнительных параметров, включая пространственно-временную динамику почвенного температурно-влажностного режима, дифференциацию скоростей деструкции растительных остатков и микроклиматическую стратификацию подстильных горизонтов, что позволит улучшить прогнозирование углеродного цикла в лесных экосистемах.

3.3 Исследование потенциала секвестрации органического углерода наземными экосистемами, развивающимися в ходе экогенетических сукцессий при самозарастании нарушенных земель как моделей естественной аккумуляции углерода органических соединений в составе наземной растительности и почв

Почвенный покров представляет собой крупнейший резервуар органического углерода, превосходя атмосферный пул в 3.2 раза и биотический – в 4 раза [116]. Российские территории играют ключевую роль в глобальном углеродном балансе, аккумулируя около 20% мировых запасов ПОВ. Согласно современным оценкам, запасы органического углерода в метровом слое почв России составляют 285-364 Pg при глобальном пуле 1417-1824 Pg [117-119].

Структура углеродного пула в 30-сантиметровом слое демонстрирует доминирование минеральных горизонтов (62% общих запасов), тогда как распределение в органогенных компонентах следующее: 20% - торф болотных почв, 9% - торф полугидроморфных почв, и 9% - углерод подстилки [120]. Дополнительно значительные запасы сосредоточены в наземной фитомассе, составляющей 38.8 Pg C (7.2% глобального запаса фитомассы, оцениваемого в 550 Pg) [117-118].

Деградация ПОВ происходит под влиянием различных природных факторов. На глобальном уровне доминирующим драйвером выступает изменение климата [120], тогда как на региональном уровне ключевое значение приобретают антропогенные воздействия - расширение сельскохозяйственных угодий и сведение лесов [121]. Конверсия природных экосистем в агроценозы привела к потере 116 Гт углерода из двухметрового почвенного слоя за последние 60 лет [122]. Особую значимость имеют потери углерода в результате деградации лесов, составляющие до 15% глобальных антропогенных выбросов [123], что подчеркивает критическую роль лесных экосистем в регулировании углеродного баланса.

Стабильность и запасы органического углерода в почвах определяются комплексным воздействием климатических условий, типа растительности и характера землепользования [124]. В контексте функционирования карбонового полигона «Ладога» на Колтушской возвышенности, ключевое значение приобретает не только количественная оценка углеродного пула, но и анализ способности почвенного органического вещества поддерживать экологические функции [125]. Одним из перспективных подходов к оценке секвестрационного потенциала является определение запасов потенциально минерализуемого углерода (Cpm), отражающего биологически активную фракцию органического вещества [126].

Проведенная аппроксимация кинетики кумулятивной эмиссии C-CO₂ в ходе 175-дневной инкубации (Рисунок 23) позволила количественно оценить параметры Cpm в

ненарушенных почвах (Таблица 13). В серогумусовом горизонте АYe дерново-подбура содержание потенциально минерализуемого углерода составляет $502,5 \pm 104,6 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$, что соответствует $15,1 \pm 3,1\%$ от общего запаса почвенного органического вещества. Расчетный запас Срт в слое 0-10 см для данного типа почвы достигает $0,48 \pm 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$.

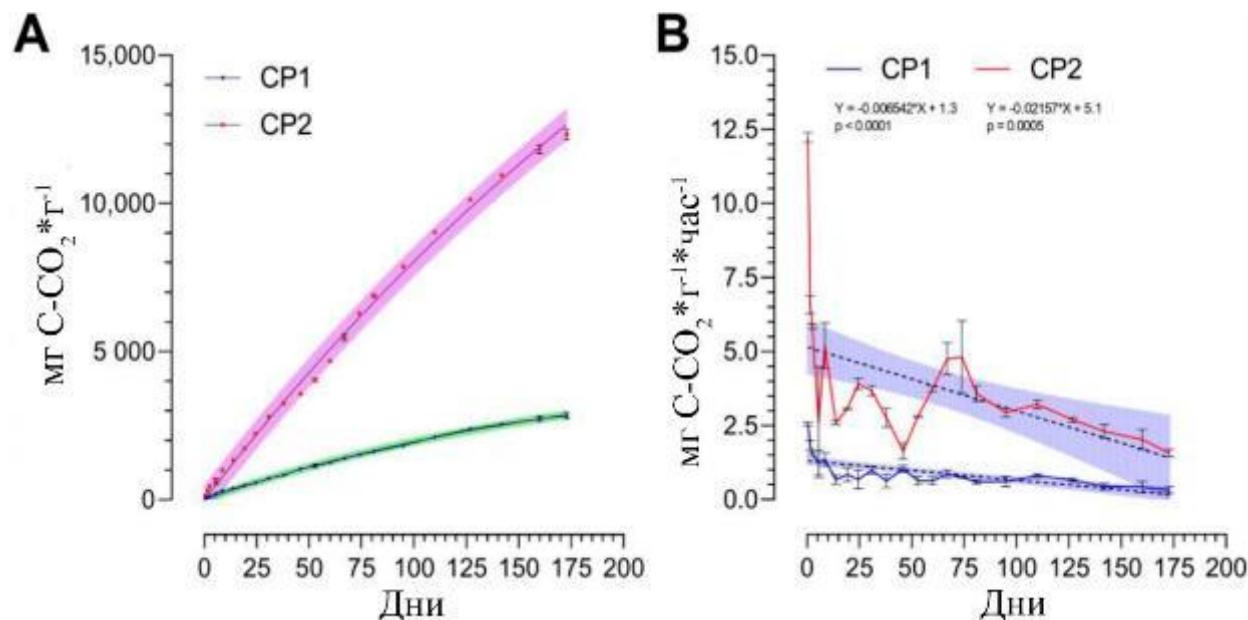


Рисунок 23 – (А) Кумулятивные кривые эмиссии С- CO_2 различными почвами. (В) Интенсивность почвенного дыхания почв в течение различных периодов инкубации. СР1 - дерново-подбур; СР2 - торфяная эутрофная почва

Полученные данные свидетельствуют о значительном потенциале биологической трансформации органического вещества в изученных почвах, что необходимо учитывать при прогнозировании динамики углеродного баланса в условиях изменяющегося климата и разработке стратегий управления почвенными ресурсами карбонового полигона.

Таблица 13. Содержание потенциально минерализуемого органического вещества и характеристики минерализации почв карбонового полигона «Ладога»

Параметры	Дерново-подбур	Торфяная-эутрофная
ПОВ, $\text{мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$	3330	38400
Срт, $\text{мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$	$502,5 \pm 104,6$	$3394,7 \pm 380,3$
Срт, % от ПОВ	$15,1 \pm 3,1$	$8,8 \pm 0,9$
Константа минерализации (к), день^{-1}	$0,005 \pm 0,001$	$0,003 \pm 0,001$
Интенсивность минерализации (ИМ), $\text{мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1} \cdot \text{день}^{-1}$	$2,5 \pm 0,2$	$9,2 \pm 0,1$
Индекс стабильности (ИС)	$5,8 \pm 1,3$	$10,4 \pm 1,3$

В торфяной эутрофной почве $C_{\text{рт}} = 3394,7 \pm 380,3 \text{ мг} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$ или $8,8 \pm 0,9\%$ от ПОВ. Запас Срт в слое 0-10 см торфяной эутрофной почвы равен $0,58 \pm 0,06 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$. Торфяные

почвы характеризуются более высокой интенсивностью минерализации по сравнению с дерново-подбуром ($9,2 \pm 0,1$ против $2,5 \pm 0,2$ $\text{мг} \times 100 \text{ г}^{-1} \times \text{сут}^{-1}$) и более высокой степенью стабилизации органического вещества. Однако есть данные, что размер и структура минерализуемого пула органического вещества торфяных почв контролируются температурным режимом и содержанием воды [126].

4 Молекулярный состав гуминовых кислот почв и оценка стабилизации ПОВ на территории карбонового полигона «Ладога»

Согласно оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), бореальная зона содержит крупнейший глобальный резервуар ПОВ, достигающий 356 Pg C в метровом слое почвы, деградация которого способна оказать существенное влияние на изменение климата на планете [127]. В рамках международных обязательств, включая Киотский протокол и Парижское соглашение, страны участники предпринимают меры по сокращению эмиссии CO₂ и ограничению глобального потепления уровнем 1.5°C [128]. В этом контексте секвестрация атмосферного углерода и оценка его депонирования в почвах в стабильном виде приобретают ключевое значение [129].

Мировая практика демонстрирует активное внедрение программ карбонового менеджмента в Северной Америке, Европе и Австралии, где реализуется концепция устойчивого управления почвенными ресурсами, направленная на повышение содержания и секвестрационного потенциала почвенного углерода [130-132]. Особый интерес представляют почвы Евразии, способные поглощать 23-28% региональных годовых выбросов CO₂. Хотя бореальные экосистемы характеризуются значительными запасами углерода, их секвестрационный потенциал, по оценкам FAO, уступает более теплым и влажным природным зонам.

Эффективный мониторинг природных экосистем через сеть карбоновых полигонов позволяет отслеживать динамику углеродного баланса [132-134]. Критически важной задачей является оценка стабилизации органического вещества, процесса формирования устойчивости к биотическим и абиотическим воздействиям [135]. Особую роль в этом процессе играют гуминовые кислоты (ГК) [136]. Их функциональные характеристики определяются комплексом факторов: климатическими условиями, составом прекурсоров гумификации и функционированием почвенной микробиоты.

Препараты гуминовых кислот выделяли в лаборатории кафедры прикладной экологии СПбГУ по модифицированной методике Международного общества по изучению гуминовых веществ (IHSS), предложенной Василевичем [137]. Методика включала две последовательные экстракции 0,1 н. раствором гидроксида натрия после предварительного

декальцирования образцов почв. Полученные щелочные экстракты подкисляли до pH 2 с последующим отделением фракции гуминовых кислот методом центрифугирования. Дополнительная очистка проводилась с использованием 10% раствора плавиковой кислоты для удаления зольных элементов, после чего осуществляли диализ в мембранный плёнке продолжительностью 10 суток.

Структурный анализ выделенных гуминовых кислот выполняли методом твердотельной ^{13}C ЯМР-спектроскопии на спектрометре Bruker Avance III 400WB (Bruker, Германия) в Ресурсном центре «Магнитно-резонансные методы исследований» Научного парка СПбГУ. Исследования проводили при рабочей частоте 100,53 МГц с применением методики CP-MAS (кросссполяризация с вращением под "магическим" углом) со следующими параметрами: скорость вращения образца 12,5 кГц, время контакта 2 мс, время релаксации 2 с, количество накоплений 3000-8000 сканов. Полуколичественная обработка спектров выполнялась путём численного интегрирования сигналов в характерных спектральных областях (Таблица 14), соответствующих основным молекулярным фрагментам гуминовых кислот, с использованием программного обеспечения MestReNova® v. 14.2.0 (Mestrelab Research, США).

Таблица 14. Химические сдвиги атомов углерода ^{13}C молекулярных фрагментов гумусовых кислот.

Химические сдвиги, ppm	Сокращения, используемые в работе	Тип молекулярных фрагментов
0–46	(CH ₂) _n /CH/C	Углерод концевых метильных групп (CH ₃), углерод метиленовых групп длинноцепочечных алкильных цепей (CH ₂), а также углерод метиленовых групп разветвлённых алкильных цепей (CH, C).
46–60	OCH ₃	Углерод метоксильных и этоксильных групп (O-CH ₃), O, N – замещенные алифатические фрагменты
60–105	OCH/OCq	Углерод CH ₂ OH групп углеводных фрагментов (CH ₂ OH), углерод СНОH групп полисахаридных колец и эфиров (СНОH), а также углерод ацеталей (OCO)
105–144	Aromatic C-C/C-H	Незамещенный ароматический углерод (H-Arom), а также аллил-замещенный ароматический углерод (C-Arom)
144–164	Aromatic O,N	O,N-замещенный ароматический углерод (O,N-Arom)
164–183	COO/N-C=O	Углерод карбоксильных групп, сложных эфиров и амидов (COO-R)
183–190	Aromatic=O	Углерод хинонных фрагментов (Arom=O)
190–204	C=O	Углерод фрагментов альдегидов и кетонов (C=O)

Для количественной оценки структурного состава гуминовых кислот по данным ^{13}C ЯМР-спектроскопии применялось разделение спектральных областей в соответствии с установленными химическими сдвигами [136]. Сигналы ароматических фрагментов (AR) рассчитывались в диапазонах 105–164 ppm и 183–190 ppm, тогда как алифатические компоненты (AL) суммировались по областям 0–105 ppm, 164–183 ppm и 190–204 ppm.

Элементный состав (C, H, N, O) препаратов гуминовых кислот определялся на элементном анализаторе LECO TruSpec MICRO в Ресурсном центре «Методы анализа состава вещества» Научного парка СПбГУ. Анализ выполнялся в трёхкратной аналитической повторности, содержание кислорода рассчитывалось по разности.

Для сравнительной оценки процессов стабилизации органического вещества были отобраны репрезентативные почвенные профили CP1 (подбур иллювиально-железистый) и CP2 (торфяная эутрофная). Данные разрезы демонстрируют контрастные условия почвообразования, что позволяет провести сравнительный анализ механизмов стабилизации углерода в различных ландшафтных позициях. Выход гуминовых кислот после щелочной экстракции приведен в Таблице 15.

Таблица 15. Основная информация об экстракции гуминовых кислот (ГК)

Горизонт	Масса почвы, г	Масса ГК, г	Выход ГК, %
CP1 О	51,48	0,77	1,51
CP1 AY	65,40	0,58	0,93
CP1 BF	102,64	0,03	0,03
CP2 TE ₁	26,15	1,32	5,01
CP2 TE ₂	31,04	1,93	6,22
CP2 TE ₃	25,26	0,95	3,84
CP2 TE ₄	39,08	0,19	0,52
CP2 TT	39,63	0,51	1,28

Элементный состав ГК служит ключевым индикатором, определяющим направленность окислительно-восстановительных и гидрогенизационно-дегидрогенизационных процессов. Проведенные исследования препаратов ГК, выделенных из почв карбонового полигона «Ладога», выявили максимальное содержание углерода (до 58%) в торфяной эутрофной почве (Таблица 16). Минимальные значения зафиксированы в горизонте TE1 торфяной эутрофной почве, тогда как максимальная концентрация азота обнаружена в горизонте О (разрез CP1).

Таблица 16. Элементный состав ГК выделенных из почв карбонового полигона «Ладога»

(n=3)

Горизонт	C, %	N, %	H, %	O, %	O/C	H/C
CP1 O	56,43	1,94	4,94	36,69	0,46	1,04
CP1 AY	55,37	1,80	4,66	38,17	0,49	1,00
CP1 BF	54,75	1,43	4,64	39,18	0,51	1,01
CP2 TE1	54,43	1,41	4,60	39,56	0,52	1,00
CP2 TE2	54,47	1,42	4,51	39,60	0,52	0,98
CP2 TE3	58,35	1,53	5,14	34,98	0,43	1,05
CP2 TE4	56,87	1,56	4,88	36,69	0,46	1,02
CP2 TT	54,81	1,52	5,28	38,39	0,50	1,15

Исследуемые почвы характеризуются повышенным содержанием углерода в составе ГК по сравнению с почвами арктических тундр, где данный показатель варьирует в диапазоне 36–44% [138]. Увеличенная доля углерода в срединной части профиля торфяных почв свидетельствует о более гомогенных условиях протекания гумификации растительных остатков [139].

Отношение H/C, являющееся критерием стабильности молекулярной структуры ГК, достигает максимальных значений в горизонте ТЕ2 торфяной эутрофной почвы. Полученные данные указывают на активное протекание процессов гидрогенизации в условиях гидроморфного режима, что коррелирует с интенсивностью гумификации при ограниченном доступе кислорода. Выявленные закономерности подтверждают значительный потенциал стабилизации органического вещества в гидроморфных ландшафтах изучаемого региона.

Для визуализации и интерпретации элементного состава гуминовых кислот была построена диаграмма Ван Кревелена, отражающая соотношение атомных отношений H/C и O/C. Анализ распределения точек на диаграмме (Рисунок 24) позволяет идентифицировать доминирующие химические процессы, указывающие на тренды трансформации органического вещества в почвах.

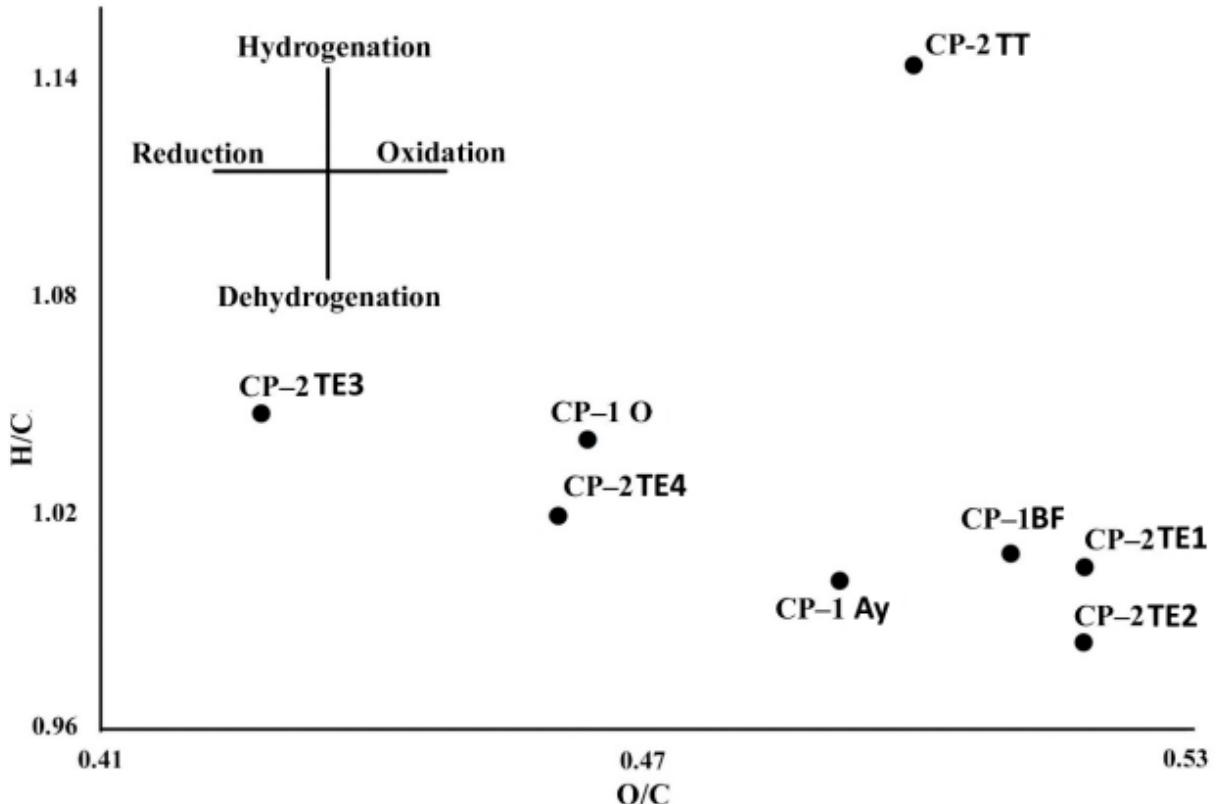


Рисунок 24 – Диаграмма Ван Кревелена элементного состава ГК

Препараты ГК демонстрируют чёткую кластеризацию в соответствии с генетическими особенностями почвенных горизонтов. Образцы из верхних органогенных горизонтов характеризуются повышенными значениями Н/С, что типично для процессов гидрогенизации и формировании алифатических структур. В то же время образцы из минеральных горизонтов смещены в область более низких отношений Н/С, что указывает на формирование ароматических структурных фрагментов и внутримолекулярной конденсации. Диаграмма позволяет проследить тренды трансформации: направление векторов изменчивости указывает на сопряжённое протекание дегидрогенизации и карбоксилирования в процессе гумификации. Выявленные закономерности подтверждают, что стабилизация органического вещества в почвах сопровождается увеличением степени ароматичности и конденсации молекул гуминовых кислот.

Проведенная интерпретация спектров ^{13}C ЯМР ГК (Рисунок 25) выявила четкие структурные закономерности и внутрипрофильную динамику их молекулярного состава. Для гуминовых кислот, выделенных из подбура иллювиально-железистого (разрез СР1), характерно доминирование алифатических структур, с максимальным вкладом неполярных алкильных фрагментов (0-46 ppm). При этом значительную долю в молекулярной архитектуре занимают ароматические компоненты ($\text{C}=\text{C}/\text{C}-\text{H}$).

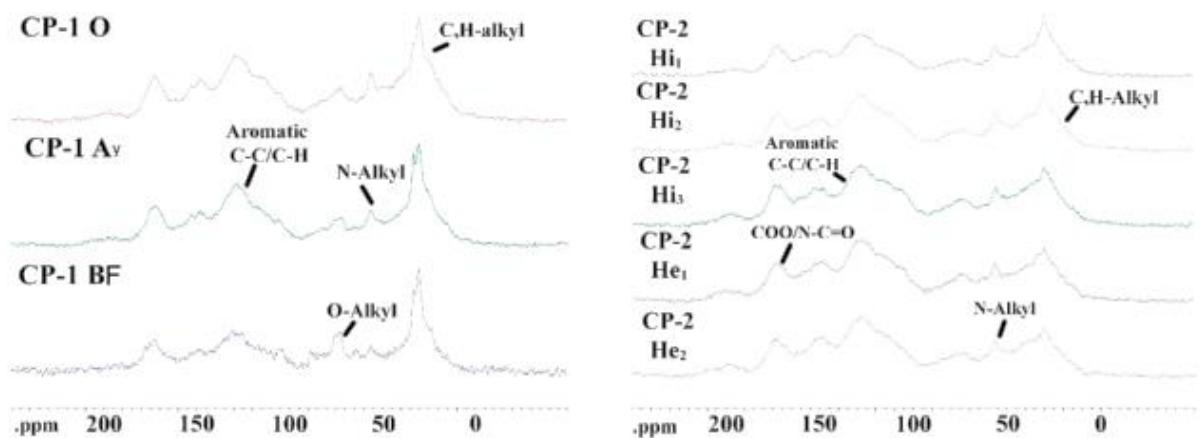


Рисунок 25 – Спектроскопия ЯМР ^{13}C CP/MAS изученных ГК, выделенных из почв карбонового полигона "Ладога"

Внутрипрофильный анализ демонстрирует последовательную трансформацию структуры ГК: от органогенного горизонта О к иллювиальному горизонту BF наблюдается сокращение доли алифатических фрагментов (С,Н-алкилы) с 37% до 28% при одновременном увеличении ароматичности с 34% до 40%. Особый интерес представляет увеличение доли O,N-замещенных ароматических структур в горизонте BF (до 13%), что свидетельствует об интенсификации процессов окислительной конденсации и включении гетероатомов в ароматические системы по мере миграции органического вещества по почвенному профилю (Таблица 17).

Таблица 17. Относительная доля углерода функциональных групп (%) и молекулярных фрагментов гуминовых кислот по данным ^{13}C -ЯМР спектроскопии

ID почв	Химический сдвиг, % от ^{13}C									C,H -AL/ O,N — AL	
	0-46	46- 60	60- 105	105- 144	144- 164	164- 183	183- 190	290- 204	AL		
CP1 O	37	5	6	27	6	17	1	1	66	34	64
CP1 AY	34	5	4	33	4	17	2	1	61	39	67
CP1 BF	28	10	6	25	13	13	2	3	60	40	53
CP2 TE1	31	4	22	26	2	11	2	2	70	30	57
CP2 TE2	40	8	4	28	5	14	1	1	67	33	68
CP2 TE3	34	2	6	29	10	4	2	6	52	48	63
CP2 TE4	36	5	10	19	6	17	2	5	73	27	55
CP2 TT	30	2	18	28	9	9	1	3	62	38	58

Проведенный анализ молекулярной структуры ГК выявил значительное накопление ароматических соединений (до 41%), что указывает на стабилизацию органического

вещества в торфяной эутрофной почве. Несмотря на это, количественное преобладание алифатических фрагментов сохраняется, что обусловлено составом прекурсоров гумификации.

Максимальные концентрации алифатических структур зафиксированы в верхних и срединных горизонтах, что коррелирует с активностью процессов торфонакопления. Формирование торфяных почв сопровождается интенсивным поступлением растительной биомассы, преимущественно состоящей из легкоразлагаемых соединений: мхи содержат до 80% углеводов и липидов. В условиях длительного переувлажнения и низкой микробиологической активности происходит селективная минерализация лабильных органических соединений и отбор наиболее устойчивых молекулярных комплексов, включая ароматические структурные фрагменты.

Полученные данные отражают фундаментальный процесс обуглероживания молекулярной структуры ГК при их трансформации в почве, что коррелирует с увеличением биохимической стабильности органического вещества в нижележащих горизонтах.

Для анализа степени гидрофобности и трансформации органического вещества представлена диаграмма интегральных показателей молекулярного состава ГК (Рисунок 26).

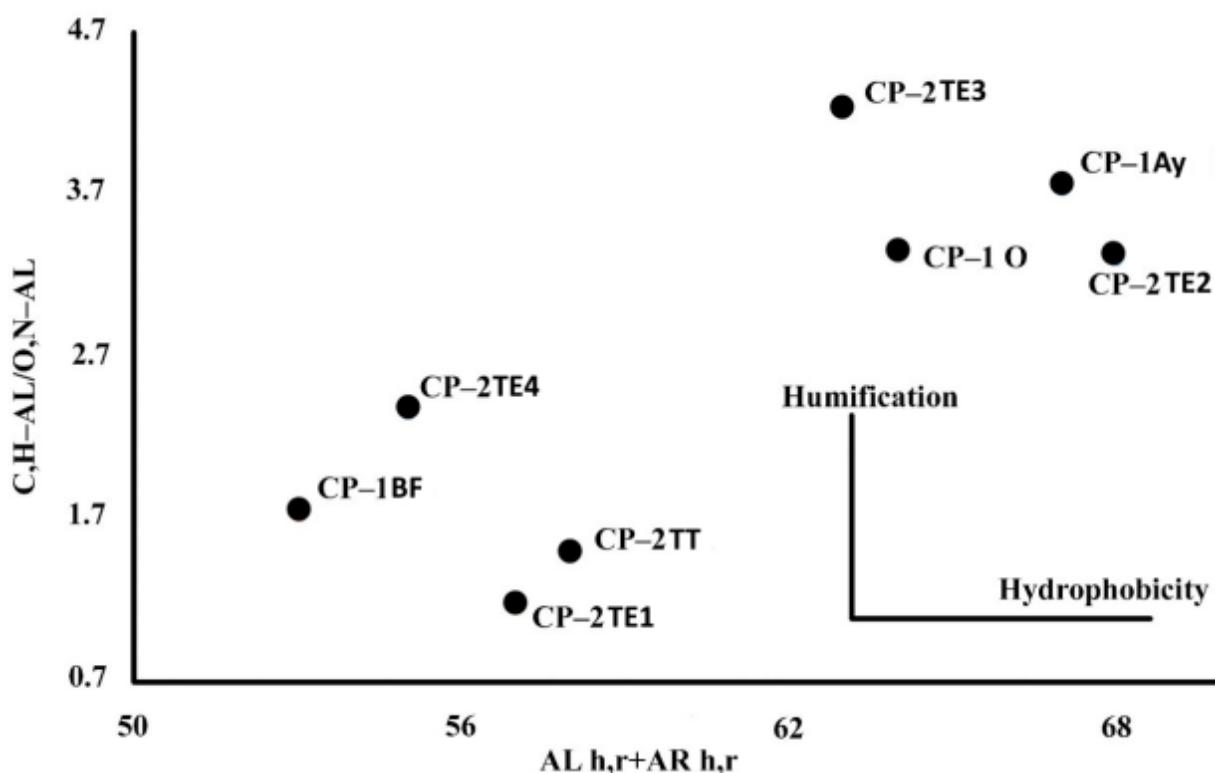


Рисунок 26 – Диаграмма интегральных показателей молекулярного состава ГК

Проведенные исследования выявили, что наиболее интенсивная гумификация органического вещества происходит в профиле торфяной эутрофной почвы. Установлено, что максимальное содержание гидрофобных молекул ГК формируются на глубине 10-30 см торфяной почвы, в то время как образцы из поверхностных горизонтов обладают меньшей гидрофобностью. Консервация органического вещества в условиях повышенного гидроморфизма способствует формированию ароматических структурных фрагментов и долговременному депонированию углерода. Увеличение доли ароматических фрагментов в составе гуминовых кислот обусловлено комплексом факторов: локальным рельефом, длительностью гумификации, степенью гидроморфизма территории и биохимическими характеристиками исходного органического материала, что подтверждает значительный потенциал торфяных почв карбонового полигона "Ладога" как резервуара устойчивого к биодеградации углерода.

Современные научные представления подтверждают, что увеличение доли ароматических структурных фрагментов в ГК способствует стабилизации почвенного органического вещества благодаря их устойчивости к биодеградации [140-141]. Проведенные сравнительные исследования выявили принципиальные различия в молекулярном составе ГК: в торфяных почвах (разрез СР2) доминируют ароматические структурные фрагменты (до 45%), тогда как в подбуруе элювиально-железистом (разрез СР1) преобладают алифатические фрагменты (69-81%). Полученные данные коррелируют с исследованиями в Нижне-Свирском заповеднике, где зрелые почвы характеризуются повышенным содержанием ароматических структур, по сравнению с молодыми аналогами, что свидетельствует об эффективной долгосрочной секвестрации углерода и подтверждает роль молекулярного состава ГК как индикатора потенциала секвестрации углерода в различных почвенно-экологических условиях.

5 Роль микробиома почв в углеродном цикле зональных и антропогенно-преобразованных экосистем южной тайги

Почвенные микроорганизмы выполняют ключевую функцию в биосферно-атмосферном цикле углерода [23-25], осуществляя деструкцию органической массы растительного, животного и грибного происхождения [25, 142-143]. В процессах трансформации углерода участвуют различные филогенетические группы, включая *Actinobacteriota*, *Proteobacteria*, *Cyanobacteria*, *Acidobacteriota*, *Myxococcota*, *Bacteroidota*, *Firmicutes*, *Verrucomicrobiota* и *Bdellovibrionota* [26]. Данные таксоны формируют функциональные группы со специализированными метаболическими функциями, влияющими на депонирование и трансформацию ПОВ [23, 144-145].

В контексте изменения климата понимание микромасштабных процессов углеродного цикла приобретает особую значимость [23]. При этом изучению почвенной микробиоты на карбоновых полигонах до настоящего времени уделялось недостаточное внимание [145]. В связи с этим, цель настоящего исследования заключается в характеристике таксономической структуры микробиома почв полигона «Ладога» методами высокопроизводительного секвенирования. Посредством статистического и биоинформационного анализа планируется оценить α - и β -разнообразие микробных сообществ и количественно определить ключевые филогенетические группы, ответственные за трансформацию органического углерода в почвах.

Почвенную ДНК выделяли по протоколу, описанному в [146]. Секвенирование вариабельной области V4 гена 16S рРНК проводили на секвенаторе Illumina MiSEQ (Illumina, San Diego, CA, USA) в Центре геномных технологий, протеомики и клеточной биологии (ВНИИСХМ, Россия) с использованием праймеров 515f (GTGCCAGCMGCCGCGTAА) и 806r (GGACTACVSGGGTATCTAAT) [147].

Общая обработка последовательностей проводилась в R 4.0 (R Core Team) с использованием пакетов dada2 (v. 1.28.0) [148] и phyloseq (v. 1.44.0) [148], в соответствии с выбранным автором рабочим конвейером. Последовательности ампликонов 16S рДНК обрабатывали в соответствии с конвейером dada2. Последовательности обрезали по длине (минимум 280 bp для прямых и 210 bp для обратных чтений) и качеству (отсутствие N, максимальное число ошибок maxEE - 2 для прямых и обратных чтений). Варианты последовательностей ампликонов (ASVs) определяли по алгоритму dada2, химерные ASVs удаляли методом «консенсуса». Таксономическую аннотацию проводили с помощью “naive Bayesian” (входит в пакет dada2), в качестве обучающего набора использовали базу данных SILVA 138 [149]; названия файлов корректировали в соответствии с LPSN [150]. Метрики α -разнообразия (наблюдаемые индексы ASV и Симпсона) и β -разнообразия (расстояние Брея-Кертиса) рассчитывали с помощью пакетов «phyloseq» и «vegan» [151]. Ординацию NMDS и расстояния Брея-Кертиса строили с помощью пакета «phyloseq». Анализ PERMANOVA проводили с помощью пакета «vegan».

После проведения биоинформатического анализа получено 729 ASV из 35 образцов. Объем секвенирования варьировал от 1244 до 12777 прочтений на библиотеку при среднем значении 3444. Анализ α -разнообразия проведен при нормировке 1244 последовательности на образец.

Таксономический анализ выявил доминирование следующих фил в почвах карбонового полигона «Ладога»: *Proteobacteria*, *Actinobacteria* и *Bacteroidetes*, за которыми следуют *Acidobacteria*, *Verrucomicrobia*, *Planctomycetes*, *Gemmatimonadetes*, *Euryarchaeota*

и Firmicutes (Рисунок 26А). В профиле подзола иллювиально-железистого наблюдается четкая стратификация микробного сообщества: в верхних горизонтах (Oi-Oe и AYe) доминируют *Proteobacteria* (40,9-56,5%), тогда как в иллювиальном горизонте BF резко возрастает доля *Gemmatimonadetes* (18,5-30,2%). В нижележащих горизонтах (BC/C) отмечается снижение *Verrucomicrobia* (1,0-3,3%) и *Gemmatimonadetes* (3,7-14,5%).

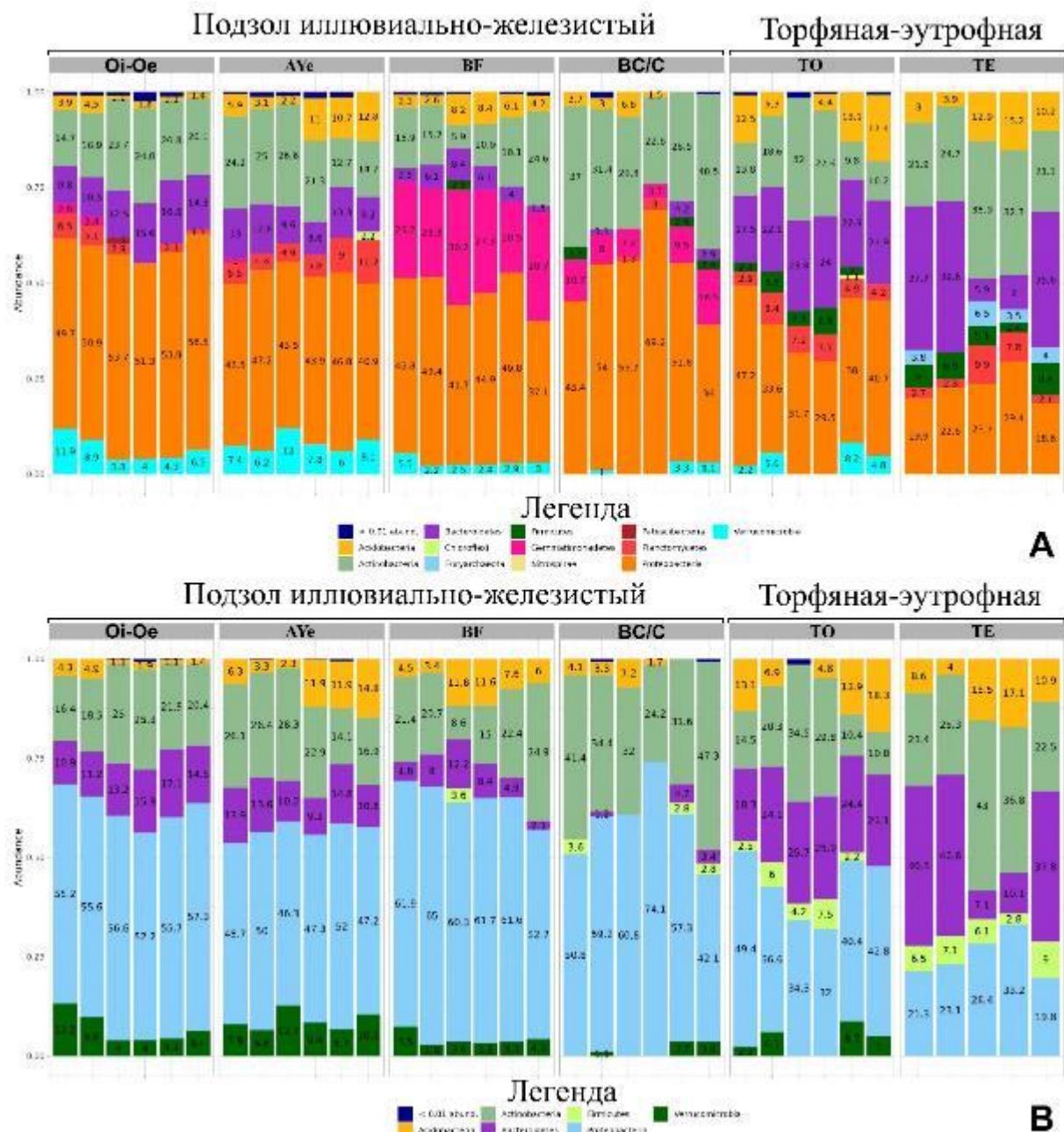


Рисунок 26 – А - Общая относительная численность фил микроорганизмов для каждого почвенного горизонта подзола и торфяной почвы (n=6); В - Относительная численность фил, участвующих в круговороте углерода [26]

Выявленные закономерности демонстрируют тесную связь таксономического разнообразия с почвенными процессами. Уменьшение доли *Verrucomicrobia* по профилю (Oি-Oе – 6,5±3,3%; Aye – 8,1±2,2%; Bs – 3,1±1,2%; BC/C – 1,2±1,6%) коррелирует с их ризосферной специализацией [152] и зависимостью от параметров плодородия [153]. Высокое обилие *Gemmimonadetes* в горизонте BF (25,5±4,2%) объясняется их адаптацией к низкому содержанию свободной воды в хорошо дренированных песчаных почвах [154], тогда как снижение их численности в горизонте BC/C (8,9±3,6%) связано с увеличением влажности.

В нижней части профиля отмечается увеличение доли *Actinobacteria* (31,5±6,4%) с преобладанием бактерий рода *Mycobacterium*, что может быть связано с процессами иллювиирования Al-Fe соединений и снижением концентрации оксидов железа и марганца, ингибирующих рост данных микроорганизмов [155]. Полученные данные подтверждают высокую специализацию микробных сообществ в зависимости от гидрологических условий и геохимических особенностей почвенных горизонтов.

Анализ микробного сообщества торфяных почв карбонового полигона «Ладога» выявил характерный таксономический профиль с доминированием *Bacteroidetes* (горизонт ТО: 20,2±0,4%; горизонт ТЕ: 25,2±16,2%), что существенно отличает данные почвы от изученного подзола. В состав доминирующих фил дополнительно вошли *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Chloroflexi*, *Verrucomicrobia*, а также представлены *Actinobacteria* и *Planctomycetes*. Особый интерес представляет обнаружение в горизонте ТО метаногенных архей *Euryarchaeota* (2,6±2,3%), что свидетельствует о протекании анаэробных процессов метаногенеза в условиях постоянного переувлажнения. Присутствие *Firmicutes* указывает на адаптацию части микробного сообщества к длительному переувлажнению. Выявленное высокое таксономическое разнообразие и специфический состав микробиома отражают уникальные биохимические условия торфяных почв, характеризующиеся низкой скоростью деструкции органического вещества, накоплением полифенольных соединений и доминированием анаэробных процессов, что в совокупности определяет их значительный секвестрационный потенциал.

Анализ функционально значимых таксонов микробиома почв карбонового полигона «Ладога» выявил специфическое распределение бактериальных групп, участвующих в круговороте углерода (Рисунок 26В). Количественная оценка проведена для таксонов с относительной численностью >0,01%, включая *Actinobacteriota*, *Proteobacteria*, *Acidobacteriota*, *Bacteroidota*, *Firmicutes* и *Verrucomicrobiota*.

В подзоле иллювиально-железистом зафиксировано доминирование *Proteobacteria* и *Acidobacteriota* в общем пуле углерод-трансформирующих микроорганизмов.

Статистический анализ выявил достоверные различия в распределении этих фил по почвенному профилю: в верхних горизонтах значимо варьировала численность *Proteobacteria* ($p<0.01$) и *Acidobacteriota* ($p<0.001$), тогда как в нижележащих горизонтах статистически значимые различия обнаружены только для *Actinobacteriota* ($p < 0.0001$).

В торфяных почвах доминирующую роль в трансформации углерода играют *Actinobacteriota*, *Proteobacteria* и *Bacteroidota*, при этом между горизонтами ТО и ТЕ наблюдаются статистически значимые различия в численности *Proteobacteria* ($p<0.05$). Полученные данные демонстрируют четкую дифференциацию функциональных групп микроорганизмов в зависимости от типа почвы и глубины горизонта, что отражает адаптацию микробных сообществ к специфическим условиям среды и их роль в процессах трансформации органического вещества.

Статистический анализ методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) выявил значимое влияние генетических горизонтов на α -разнообразие микробиома по всем исследованным индексам: количеству ASV ($Df1 = 5$, $Df2 = 29$, $F = 2.6715$, $p < 0.01$), индексу Симпсона ($Df1 = 5$, $Df2 = 29$, $F = 5.049$, $p < 0.01$) и индексу Шеннона ($Df1 = 5$, $Df2 = 29$, $F = 3.6097$, $p < 0.01$). Сравнительный анализ показал существенные различия в α -разнообразии между подзолом и торфяной почвами. Максимальное количество операционных таксономических единиц (ASV) отмечено в горизонте Oi-Oe подзола, тогда как минимальные значения наблюдались в нижележащих горизонтах BC/C, что согласуется с общей тенденцией снижения микробного разнообразия по мере увеличения глубины почвы (Рисунок 27А-В).

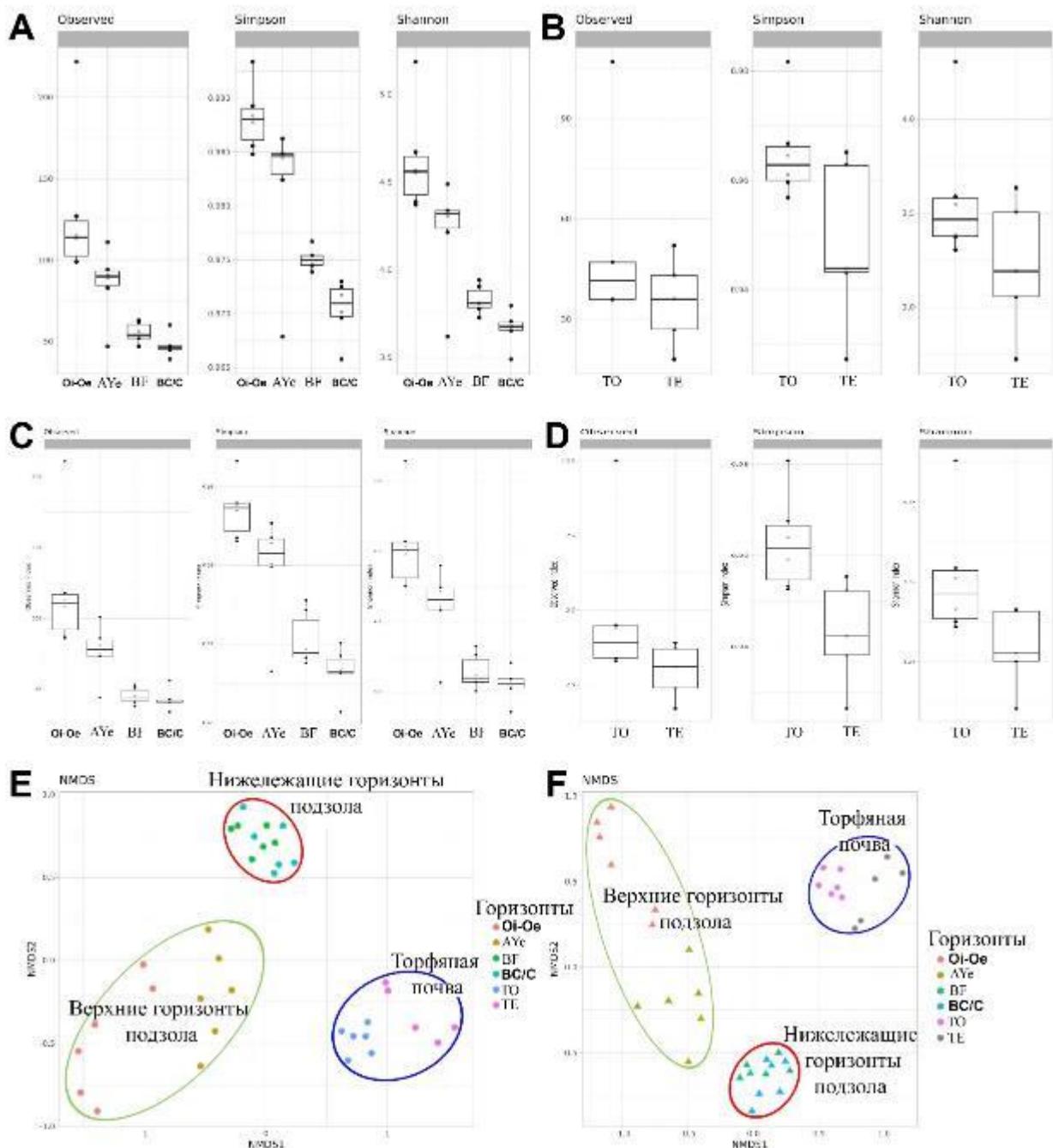


Рисунок 27 – Индексы α -разнообразия общей относительной численности для каждого почвенного горизонта А - для подзола, В - для торфянной почвы (наблюдаемые ASV, индексы Симпсона и Шеннона). Индексы α -разнообразия относительного обилия для фил, участвующих в круговороте углерода, для каждого почвенного горизонта С - для подзола, Д - для торфянной почвы (наблюдаемые ASV, индексы Симпсона и Шеннона). Многомерный анализ β -разнообразия методом NMDS с использованием несходства Брея-Кертиса Е - общего относительного обилия, F - для фил, участвующих в круговороте углерода

Торфяные почвы характеризовались наиболее низкими показателями видового богатства согласно индексу ASV, значительно уступая даже горизонту ТО, причем оба горизонта торфяных почв демонстрировали сниженное разнообразие по сравнению с подзолом. Статистически значимые различия в выравненности видовой структуры (индекс Симпсона) обнаружены как между торфяными и подзолистыми почвами, так и между разными горизонтами подзола, с максимальным контрастом между поверхностными и нижележащими горизонтами.

Аналогичная стратификация выявлена для α -разнообразия фил, участвующих в круговороте углерода (Рисунок 27 С-Д). Установлены статистически значимые различия между подзолистыми и торфяными почвами ($F = 30.43$, $DF_1 = 5$, $DF_2 = 198$, $p < 0.0001$), а также между верхними (O_i-O_e и A_{Ye}) и нижними (BF и BC/C) горизонтами подзола ($F = 9.20$, $DF_1 = 5$, $DF_2 = 132$, $p < 0.0001$). Полученные данные свидетельствуют о тесной связи между типом почвообразования, глубиной горизонта и структурным разнообразием микробных сообществ, участвующих в трансформации органического вещества.

Сравнительный анализ подзолистых и торфяных почв выявил существенные различия в таксономическом составе на низших таксономических уровнях, обусловленные спецификой генезиса и физико-химических свойств почв [156-157]. Подзолы характеризуются пониженным содержанием органического вещества и лучшими условиями дренажа, тогда как торфяные почвы отличаются повышенной влажностью и значительными запасами углерода. Результаты анализа β -разнообразия методом NMDS на основе несходства Брея-Кертиса (Рисунок 27 Е-Ф) показали четкую дифференциацию микробных сообществ: образцы поверхностных горизонтов подзола (O_i-O_e и A_{Ye}) формируют обособленные кластеры, иллювиальные горизонты (BF и BC/C) образуют компактные группировки, а торфяные почвы (горизонты ТО и ТЕ) демонстрируют уникальные кластерные паттерны. Статистическое подтверждение PERMANOVA ($Df_1 = 5$, $Df_2 = 29$, $F = 8.1903$, $p < 0.001$) установило значимое влияние генетических горизонтов на β -разнообразие. На основании комплексного анализа выделены три дискретные экологические группы микробных сообществ: 1) поверхностные горизонты подзола, 2) иллювиальные горизонты подзола, 3) торфяные почвы, что отражает фундаментальные различия в условиях среды и функциональной специализации микроорганизмов в процессах трансформации органического вещества и углеродного цикла.

Проведенный таксономический анализ выявил 11 фил бактерий и 1 филу архей в почвах карбонового полигона "Ладога". Доминирующими бактериальными филами в подзолистых и торфяных почвах являются *Proteobacteria* и *Actinobacteria*, однако распределение таксонов демонстрирует четкую связь с генетическими горизонтами:

Nitrobacter ассоциированы с верхними горизонтами подзола (Oi-Oe), *Verrucomicrobia* концентрируются в ризосферной зоне горизонта AYe, а *Gemmimonadetes* адаптированы к дренированным условиям горизонта BF. Торфяные почвы характеризуются повышенным содержанием *Firmicutes* и наличием метаногенных архей *Euryarchaeota* в горизонте TE, что отражает анаэробные условия среды.

Кластерный анализ выявил три независимые группировки микробных сообществ: поверхностные горизонты подзола, иллювиальные горизонты подзола и торфяные почвы. Статистически значимые различия в относительном обилии таксонов между этими группами обусловлены фундаментальными различиями в генезисе почв - подзолы представляют собой органо-минеральные системы с поверхностной аккумуляцией органического вещества, тогда как торфяные почвы являются органогенными образованиями с разной степенью разложения торфа.

Среди фил, участвующих в круговороте углерода, доминируют *Actinobacteriota* и *Proteobacteria* в подзолах, а в торфяных почвах к ним добавляется *Bacteroidota*. Полученные данные свидетельствуют о более высоком потенциале трансформации углерода в переувлажненных почвах, способных вносить значительный вклад в климатические изменения через эмиссию парниковых газов, в то время как в подзолистых почвах преобладают процессы депонирования углерода. Выявленные закономерности подчеркивают необходимость учета типа почвообразования при оценке роли наземных экосистем в глобальном углеродном цикле.

Анализ трансформации микробиома почв в процессе перехода в залежное состояние выявил наиболее значительные изменения таксономического состава в верхних старопахотных горизонтах, а также в лесной подстилке и подзолистом горизонте фоновой почвы. Установлено, что с увеличением длительности залежного состояния происходит постепенное восстановление параметров почвенной среды, выражаясь в снижении содержания ПОВ и уменьшении кислотности, что создает условия для восстановления олиготрофного микробного сообщества, характерного для иллювиально-железистых подзолов.

Процесс трансформации почв на залежных территориях демонстрирует тесную корреляцию с временным фактором почвообразования [158]. С увеличением продолжительности залежного режима наблюдаются последовательные изменения как в таксономической структуре микробного сообщества, так и в физико-химических параметрах и морфологических особенностях почв. Однако остается ряд вопросов требующих дальнейшего изучения: временные рамки полного восстановления микробного сообщества в пост-агрогенных почвах и идентификация дополнительных факторов, определяющих

изменение таксономического состава микробиома. Перспективным направлением исследований представляется изучение биотических факторов, включая изменение растительного покрова и биотических взаимодействий, в процессе восстановления почвенных экосистем.

6 Анализ концентраций, потоков и эмиссионных соотношений для углеродсодержащих газов

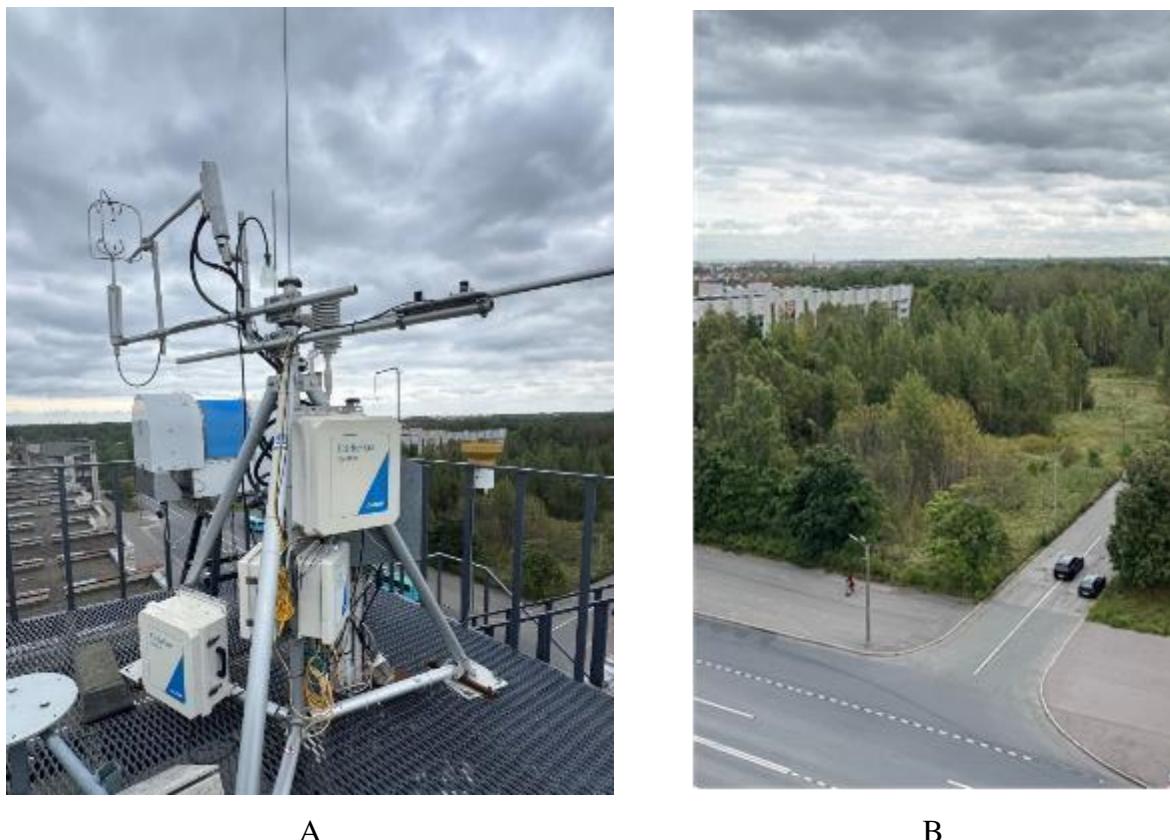
6.1 Анализ потоков СО₂ для урбанизированных территорий пригорода Санкт-Петербурга

Станция атмосферного мониторинга СПбГУ (далее Pet) расположена в Старом Петергофе (59.88° с.ш. и 29.83° в.д., 40 м над уровнем моря), в 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга и на расстоянии 3 км от Финского залива на террасированной равнине между берегом Финского залива и Балтийско-Ладожским уступом. Вблизи станции Pet (в радиусе 10км) основные антропогенные источники - газораспределительные системы, жилые массивы, транспорт и очистные сооружения.

Для местности, где расположена станция СПбГУ, характерны преобладающие юго-юго-западные – западо-юго-западные ветры (~30%). Центральные районы Санкт-Петербурга, расположенные к востоку от станции, являются самыми мощными антропогенными источниками, однако ветры восточных направлений, приносящие загрязненные городские воздушные массы, наблюдаются существенно реже (~10%).

Измерительная система для проведения пульсационных (eddy covariance) наблюдений потоков СО₂ фирмы LI-COR была установлена летом 2023 г. на крыше здания НИИФ им.Фока (Ресурсный центр «Геомодель» Научного парка СПбГУ, 2025) [159-160]. Со второй половины августа 2023 г. велось тестирование работы системы, первичное накопление данных и их предварительный анализ. Комплектация измерительной системы Eddy Covariance System, установленной на станции Pet (фото аппаратуры и характерного ландшафта в окрестности станции приведено на Рисунке 28) включает в себя: модуль Eddy Flux с NDIR-газоанализатором закрытого типа LI-7200RS для измерения концентраций СО₂ и H₂O. При частоте измерений 10Гц среднеквадратичное отклонение концентрации СО₂ составляет ~0.11 ppm [5, 161]; высокоточный трёхосевой (3D) ультразвуковой анемометр (модель MP Cage, семейство uSonic-3) производства компании МЕТЕК. Анемометр uSonic-3 Cage MP предназначен для работы в условиях, когда нет основного преобладающего направления ветра [5]; набор датчиков серии Biomet LI-COR, включающий модуль для регистрации и архивации данных, датчики атмосферного давления, температуры и

влажности воздуха, датчик дождя, осадкомер, датчик FAR [5]. Этот набор позволяет получать дополнительную информацию о параметрах окружающей среды, необходимой для корректной обработки данных системой EddyFlux [5, 162-163].



A

B

Рисунок 28 – Фото (а) измерительной системы Eddy Covariance System, установленной на станции Pet и (б) характерного ландшафта в окрестности станции

Работа основана на результатах первого полного года измерений после установки и запуска пульсационной системы на станции Pet. Временные рамки этого годичного периода, который рассматривается нами как своего рода тестовый, следующие: с 17.08.2023 до 22.07.2024. В Таблице 18 для каждого месяца, входящего в исследуемый период, представлены даты, когда измерения отсутствовали (причины – технические неполадки, неблагоприятные погодные условия).

Таблица 18. Периоды пробелов в пульсационных измерениях на станции Pet.

Месяц и Год (MM.YYYY)	Даты пробелов в измерениях
08.2023	1-17
09.2023	-
10.2023	-
11.2023	19-30

12.2023	1-3, 15-31
01.2024	1-8
02.2024	-
03.2024	-
04.2024	-
05.2024	-
06.2024	17, 20-24
07.2024	23-30

Расчет значений потока CO₂ (F_{CO_2}) с периодом осреднения 30 минут проводился с помощью программного пакета EddyPro, при этом использовалась следующая формула:

$$F_{CO_2} \approx \rho_a w' s' \quad (1)$$

где, F_{CO_2} – поток (удельный) CO₂ [мкмоль·м⁻²·с⁻¹], ρ_a – плотность воздуха, w' – мгновенные отклонения вертикальной скорости ветра от средних значений, s' – мгновенные отклонения отношения смеси газа в атмосферном воздухе от средних значений. Положительные значения F_{CO_2} характеризуют преобладание источников на исследуемой территории, отрицательные значения потоков – преобладание стоков [5, 162-163].

Обработка массивов измерений проводилась в два основных этапа. Первый этап – предварительная обработка – заключается в фильтрации данных и заполнении пропусков: находятся значения, которые не попадают в коридор $\pm 3.5\sigma$ для средних значений отношения смеси CO₂ и коридор $\pm 5\sigma$ для скорости ветра [164]. Далее эти случайные выбросы заменяются на средние значения, характерные для данного периода времени. На втором этапе проводится контроль качества данных по Mauder and Foken [165], во время которого фильтруются периоды резких изменений концентрации CO₂ и стационарных состояний. Для каждого теста и для каждой соответствующей переменной EddyPro выводит флаг контроля качества, который указывает, прошла ли переменная тест: «0» имеют данные высокого качества, «1» означает, что значения потока подходят для анализа бюджета, «2» – данные следует отбросить из результирующего набора данных из-за их плохого качества. При этом пользователь сам решает, следует ли исследовать временные ряды с флагами качества, отличными от «0», и оценивать их на предмет физической правдоподобности [5, 162-163]. Далее в нашем исследовании мы использовали данные с флагом качества «0».

Кратко остановимся на основных источниках погрешности при использовании пульсационного метода определения потоков [5]. В Таблице 19 перечислены источники погрешностей и их величины для единичного измерения. Видно, что в совокупности они могут давать значение относительной суммарной погрешности более 100%, но поскольку

при обработке данных усреднение идет по большому массиву данных, результирующие погрешности минимизируются при правильной эксплуатации оборудования.

Таблица 19. Основные источники погрешностей пульсационного метода измерений потоков CO₂

Источники погрешности	Какие потоки могут измениться	Диапазон изменения
Искажение пульсаций	Все	5-30%
Несогласованность во времени	Все	5-15%
Пиковые значения, шум, помехи	Все	0-15%
Неправильная установка	Все	0-25%
Флуктуации плотности воздуха	CO ₂ , H ₂ O	0-50%
Ошибка при расчете потока тепла по данным анемометра	Поток явного тепла	0-10%
Размытие полосы поглощения	В основном CO ₂	0-5%
Спектроскопические эффекты	Любой газ	0-30%
Пропуски в регистрации	Все	0-20%

Кроме оценки потоков, программа EddyPro позволяет оценить зоны охвата пульсационных измерений, характерные для конкретной станции. Это территория (или пространственная область экосистемы) с ненулевым вкладом в измеряемые значения потоков CO₂. Для того, чтобы получить информацию о пространственном распределении источников CO₂ в окрестностях нашей станции, был проведен анализ следа CO₂ (CO₂ footprint) с использованием модели Kljun et al. [166].

6.1.1 Анализ результатов измерений аппаратурой Eddy Covariance System на станции Pet

Ряды значений температуры (T, °C) и относительной влажности воздуха (RH, %), зарегистрированные измерительной системой Eddy Covariance System на нашей станции, даны (в качестве иллюстративного материала) на Рисунке 29.

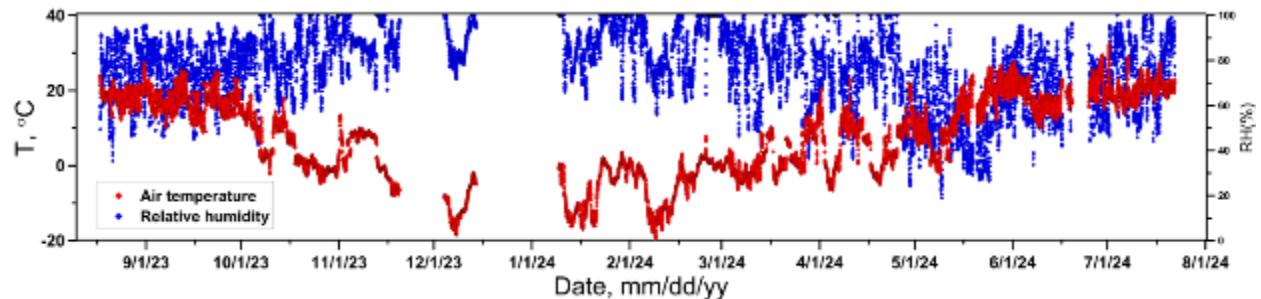


Рисунок 29 – Температура и влажность воздуха для периода с июля 2023г. по август 2024 г.

По данным с июля 2023г. по август 2024 г. штилевые условия на станции были относительно редки, скорость ветра менее 1 м/с встречалась в ~ 7 % случаев. Большую часть времени его скорость превышает 1 м/с: от 1 до 3 м/с – 61%, от 3 до 5 м/с – 27 %, выше 5 м/с – 5 % (роза ветров представлена на Рисунке 30).

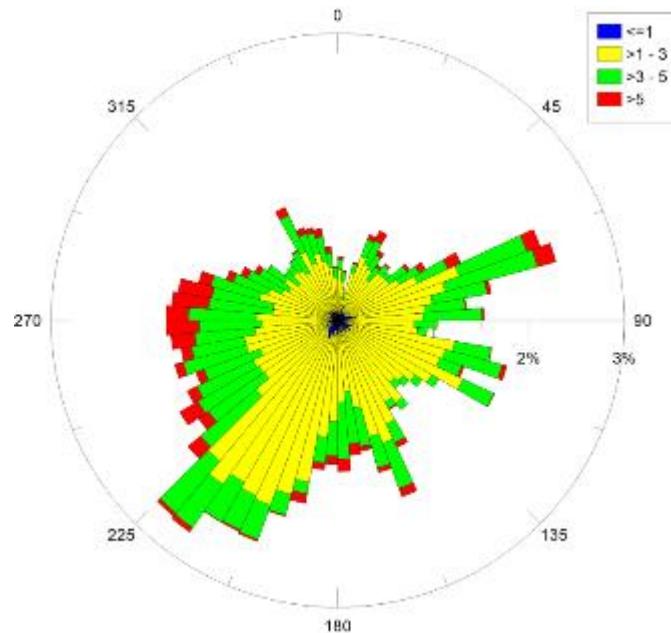


Рисунок 30 – Роза ветров для станции Pet для периода с июля 2023г. по август 2024 г.

Для станции атмосферного мониторинга СПбГУ годовое значения потока CO₂, полученное нами за период с августа 2023г. по июль 2024 г. составило $F_{CO_2}=1.76\pm0.38$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹ (2.4 ± 0.5 кт·км⁻²·год⁻¹), что сопоставимо как с ранее полученными результатами для нашей местности, так и с оценками потоков для других станций (Таблица 20). Значения F_{CO_2} для станции Pet близки к оценкам потоков для Кракова (Польша) [167], 0.8-7.7 кт·км⁻²·год⁻¹ и Пюи-де-Дом (Франция) [168], 1.3 ± 0.7 кт·км⁻²·год⁻¹, а также сопоставимы с минимальными значениями для урбанизированных территорий с низкой плотностью жилой застройки и с невысокой транспортной активностью: 1.8 кт·км⁻²·год⁻¹ для г. Сакай (префектура Осака) [169]. Общий ряд значений F_{CO_2} за рассматриваемый период приведен на Рисунок 31.

Таблица 20. Значения F_{CO_2} (т·км⁻²·год⁻¹), полученные на станции Pet в сравнении с результатами независимых исследований.

	Pet		Другие станции
	Настоящая работа	Литературные источники	
F_{CO_2} , кт·км ⁻² ·год ⁻¹	2.4 ± 0.5 2023-2024 гг.	6 ± 4 2014-2015 гг. [170]	0.8-7.7 2005-2009 гг., Krakow [167]

		4 – 7 2018г. [171]	1.3±0.7 2010-2013 гг., Puy-de-Dôme [168] 1.8-17.9 2015-2016 гг., Сакай префектура Осака [169] 3.9-59.7 2017-2018, Сеул [172]
--	--	-----------------------	---

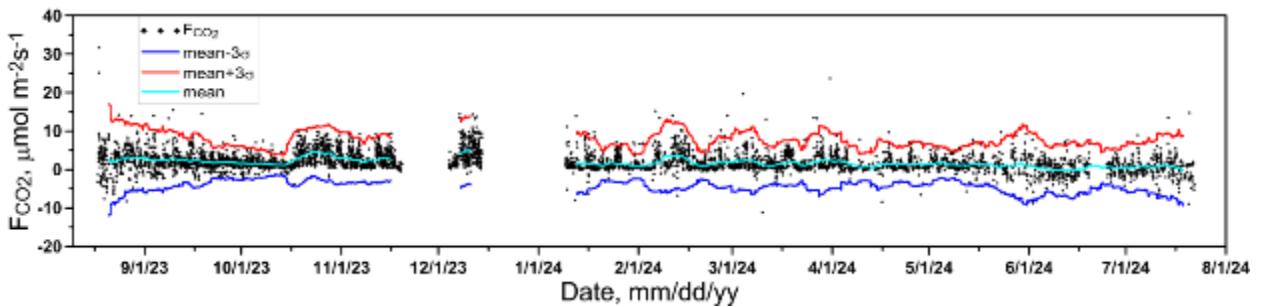


Рисунок 31 – Зависимость F_{CO_2} от времени, скользящее среднее – голубая линия, полосы Боллинджера ($\pm 3\sigma$) – синяя и красная линии.

Для исследования особенностей источников и стоков, зависящих от времени года, нами было проведено разделение годичного периода на два сезона: «зима» – холодный период с ноября по март и «лето» – теплый период с апреля по октябрь, при этом мы ориентировались на сроки начала вегетации, которые определялись по наличию отрицательных потоков в дневное время и результатам спутникового мониторинга (аппаратура ОСО-2) значений валовой первичной продукции (GPP) для территории Ленинградской области [173]. Далее для этих двух сезонов мы провели исследование следа (footprint) CO_2 для территории вокруг нашей станции, а также количественно оценили вклад источников и стоков, интенсивность которых зависит от времени, в наблюдаемые значения потоков CO_2 . Средние значения потока CO_2 для выделенных двух сезонов, а также значения F_{CO_2} для ночного и дневного периодов для этих сезонов, полученные в результате анализа данных пульсационных измерений в 2023-2024гг., представлены в Таблице 21.

Таблица 21. Среднее значение потока CO_2 для «летнего» и «зимнего» сезонов (2023-2024гг.), а также значения потока CO_2 для ночного и дневного периодов этих сезонов.

	Период			
	«зима»		«лето»	
	1.94±0.49		1.63±0.30	
	ночь	день	ночь	день
F_{CO_2} , мкмоль· $m^{-2} \cdot c^{-1}$	1.63±0.42	2.41±0.57	1.85±0.29	1.37±0.34

С целью изучения следа CO₂ для области 90% вклада, которая по результатам наших пульсационных измерений составляет ~300 м, была проведена сортировка всего массива F_{CO2} в зависимости от направления ветра (8 секторов по 45° каждый). Средние значения F_{CO2} для соответствующих секторов даны в Таблице 22 и графически представлены на Рисунке 32. Для обоих сезонов максимальные значения потоков наблюдаются при северо-восточных – юго-восточных направлениях ветра, где расположена ближайшая автодорога и здания СПбГУ. Если зимой основными предполагаемыми источниками в пределах трехсотметровой области является автотранспорт и здания, то летом добавляется источник и сток (в зависимости от времени суток) в виде растительности.



Рисунок 32 – Потоки CO₂ для зимнего (А) (голубые линии) и для летнего (В) (зеленые линии) периода, где крест – месторасположение измерительной аппаратуры, белый круг с радиусом 300м – область 90% вклада в измерения потоков, в белых прямоугольниках указаны значения F_{CO2} [$\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$] для соответствующих направлений ветра

Таблица 22. Значения потока CO₂ для «зимнего» и «летнего» сезонов в зависимости от направления ветра.

Среднее направление ветра, ° (сектор, °)	F _{CO2} , $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	
	«зима»	«лето»
0 (337.5 – 22.5)	1.71	1.06
45 (22.5 – 67.5)	2.84	2.53
90 (67.5 – 112.5)	4.81	3.32
135 (112.5 – 157.5)	3.35	2.50
180 (157.5 – 202.5)	0.60	1.06
225 (202.5 – 247.5)	0.76	1.42
270 (247.5 – 292.5)	0.41	0.85
315 (292.5 – 337.5)	1.29	0.86

Для основных источников, интенсивность которых зависит от сезона («лето» - «зима») и времени суток («день» - «ночь») – к таким на нашей станции можно отнести автотранспорт и влияние вегетации – нами была проведена оценка соответствующих потоков CO₂. С этой целью были использованы данные F_{CO₂}, приведенные в Таблице 22. Мы предполагали, что «зимой» влияние природных источников минимально для нашей станции, в результате F_{CO₂} для дня и ночи может быть записан следующим образом:

$$F_{CO_2\text{ wn}} = N1 + A1 \quad (2)$$

$$F_{CO_2\text{ wd}} = N2 + A2 \quad (3)$$

где, F_{CO₂}_{wn} – суммарный «зимний» ночной поток CO₂, F_{CO₂}_{wd} – суммарный «зимний» дневной поток CO₂, N1 – зимние фоновые значения потока CO₂ ночью, N2 – зимние фоновые значения потока CO₂ днём, A1 – поток CO₂ от автотранспорта в «зимний» сезон ночью, A2 – поток CO₂ от автотранспорта в «зимний» сезон днем.

Если предполагать, что: а) A1<<A2, т.е. влияние выбросов от автотранспорта днем существенно выше, чем ночью, и б) N1≈N2, т. е. фоновые значения потока CO₂ для нашей станции имеют близкие или равные значения днем и ночью, то вычитая из (3) выражение (2), можно оценить значение потока CO₂ от автотранспорта A2=F_{CO₂}_{wd}-F_{CO₂}_{wn}=0.78±0.15 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. Из Рисунка 33, где представлена зависимость потоков CO₂ для «зимнего» сезона в зависимости от направления ветра видно, что максимальный вклад автотранспорта в наблюдаемые значения потока CO₂ характерен для северо-восточных – юго-восточных направлений, где расположена ближайшая к измерительной станции автодорога (с кольцевой автобусной остановкой).

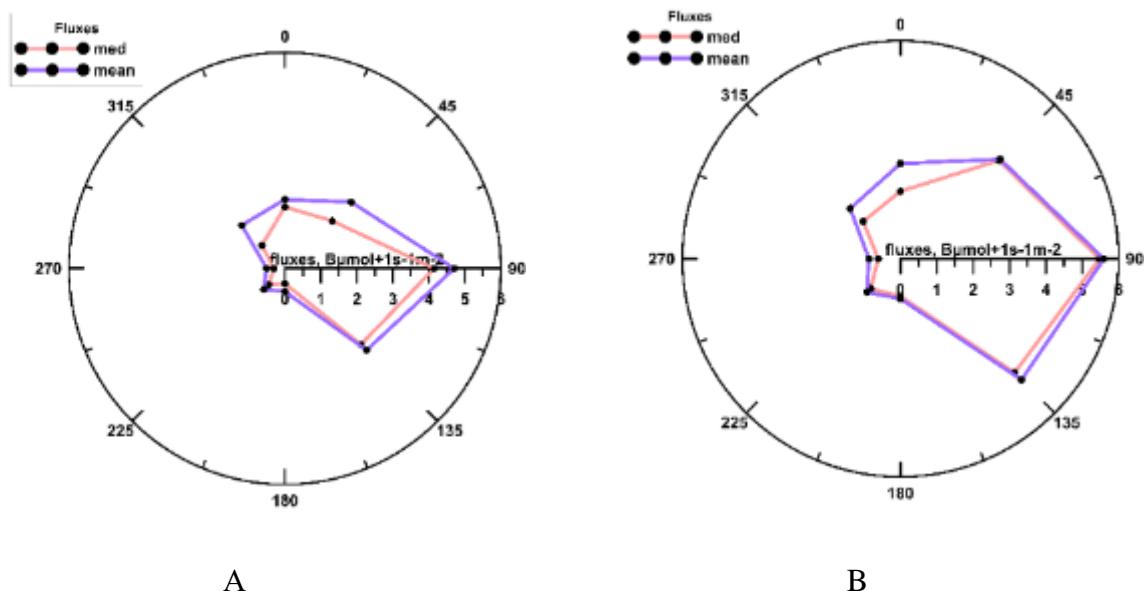


Рисунок 33 – Зависимость суммарного FCO₂ для «зимнего» сезона от направления ветра:
ночь (А) и день (В)

«Летом» к антропогенным источникам CO₂ добавляются естественные источники и стоки, связанные с вегетацией и имеющие зависимость от времени суток. Таким образом, аналогично выражениям (2) и (3), для «летнего» сезона можно написать следующие уравнения:

$$F_{CO_2_sn} = N3 + R3 + A3 \quad (4)$$

$$F_{CO_2_sd} = N4 + R4 - P + A4 \quad (5)$$

где, $F_{CO_2_sn}$ – суммарный «летний» ночной поток CO₂, $F_{CO_2_sd}$ – суммарный «летний» дневной поток CO₂, $N3$ – «летние» фоновые значения потока CO₂ в ночное время, $N4$ – «летние» фоновые значения потока CO₂ в дневное время, $R3$ – поток CO₂ за счет ночного дыхания экосистемы, $R4$ – поток CO₂ за счет дневного дыхания экосистемы, P – поток CO₂, обусловленный процессами фотосинтеза, $A3$ – ночной поток CO₂ от автотранспорта «летом», $A4$ – дневной поток CO₂ от автотранспорта «летом».

Также как и для «зимнего» периода предполагаем, что: а) $A3 \ll A4$, т.е. влияние выбросов от автотранспорта днем существенно выше, чем ночью, б) $N3 \approx N4$, т.е. фоновые значения потока CO₂ ночью и днем близки, и в) $R3 \approx R4$, т.е. поток CO₂ за счет дыхания экосистемы не имеет выраженной суточной зависимости, тогда вычитая из уравнения (5) уравнение (4), мы получим следующее выражение:

$$F_{CO_2_sd} - F_{CO_2_sn} = A4 - P \quad (6)$$

содержащее две неизвестные: P – поток CO₂ за счет процессов фотосинтеза (поглощение), и $A4$ – вклад автотранспорта в суммарный поток CO₂ в летний период.

Чтобы решить уравнение (6) и определить значения P и $A4$, нами была привлечена дополнительная информация об интенсивности движения автотранспорта на отрезке кольцевой автодороги (со 102 км по 107 км КАД), входящем в зону 100% охвата наших пульсационных измерений (~4 км). По нашему запросу такие данные за 2023-2024 годы были предоставлены нам ФКУ УПРДОР Северо-Запад. Анализ показал, что интенсивность движения автотранспорта на рассматриваемом отрезке КАД имеет выраженный годовой ход с минимумом в январе и максимумом в июне-июле. Расчеты с использованием данных ФКУ УПРДОР Северо-Запад также показали, что средняя интенсивность движения автотранспорта составила ~14 и ~26 тысяч автомобилей в месяц для «зимнего» и «летнего» периодов, соответственно. Предполагая, что интенсивности движения автотранспорта на

КАД и ближайших улицах характеризуются едиными сезонными и суточными колебаниями, получаем, что $A4=A2*1.9$. Следовательно, оценка потока CO_2 от автотранспорта в «летний» период для нашей станции составляет $A4=1.49\pm0.28 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Мы полагаем, что максимальные значения потока CO_2 , наблюдающиеся при ветре восточных направлений (Рисунок 33), обусловлены в большей степени влиянием автодороги (Ульяновская ул.), расположенной в радиусе ~300 м с восточной стороны от нашей станции.

Теперь определим вклад естественного стока CO_2 за счет процессов фотосинтеза в суммарный «летний» дневной поток; согласно уравнению (6), он равен $P=A4-(F_{\text{CO}_2_sd}-F_{\text{CO}_2_sn})=1.96\pm0.33 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ или $0.76\pm0.13 \text{ кгC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$. Полученные нами оценки P хорошо совпадают со средними значениями $GPP=0.81 \text{ кгC}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ [174], полученными для Ленинградской области по данным спутниковых измерений аппаратуры ОСО-2.

Для определения территории, где наблюдается наиболее интенсивное поглощение CO_2 (сток) построим зависимость отрицательных значений «летних» дневных потоков CO_2 от направления ветра (Рисунок 34). Видно, что в этом случае поток CO_2 не имеет ярко выраженной зависимости от направления ветра (как например, положительные потоки для зимнего времени, представленные на Рисунке 32), однако отметим, что наиболее заметный сток CO_2 (составляющий $2.94 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$) формируется областью к востоку – юго-востоку от нашей станции.

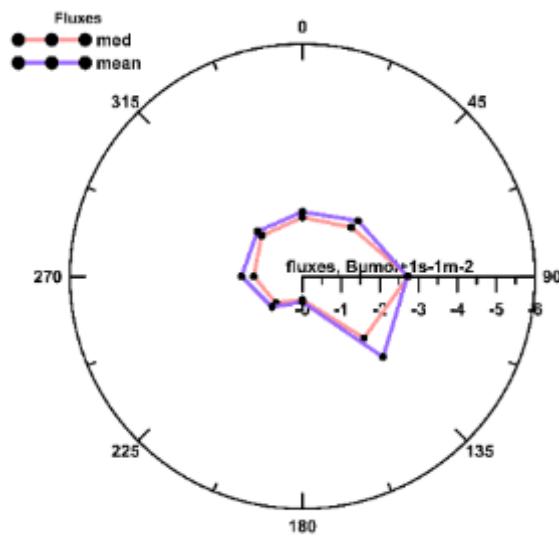


Рисунок 34 – Зависимость отрицательных значений дневных летних потоков CO_2 от направления ветра

Остановимся подробнее на анализе среднемесячных суточных вариаций F_{CO_2} . На Рисунке 35 для июля 2024г. и Рисунке 36 для января 2024г. представлен средний суточный

ход F_{CO_2} с изменчивостью (временной шаг 30 минут), а также варианты его аппроксимации полиномами 4-ой, 5-ой степени и синусоидальной зависимостью. Эти месяцы (июль и январь) были выбраны нами для иллюстрации характерных особенностей суточного хода, наблюдавшихся на станции Pet для теплого и холодного сезонов. В летнее время, когда активно происходит фотосинтез, характерные минимумы F_{CO_2} отмечаются в дневное время, в то же время в зимние месяцы в середине дня потоки CO_2 достигают своих максимальных значений.

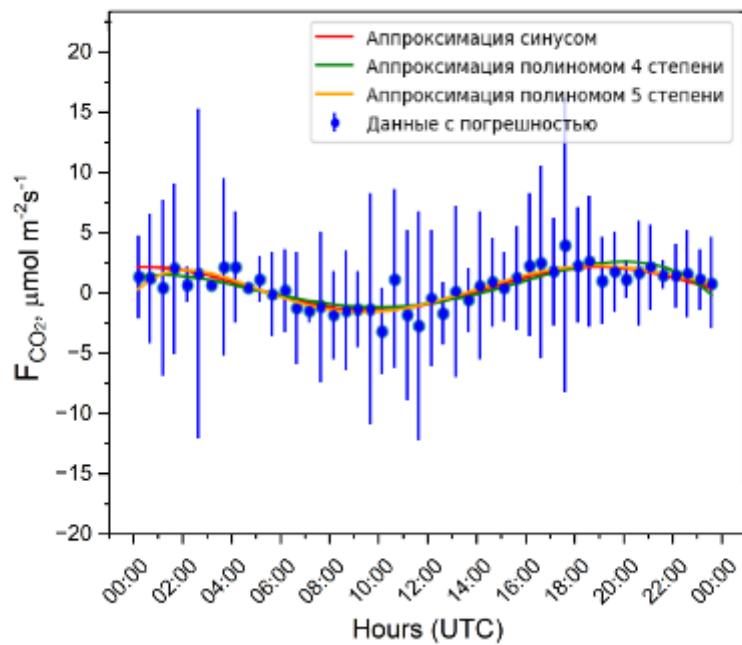


Рисунок 35 – Средний суточный ход F_{CO_2} для июля 2024 г.

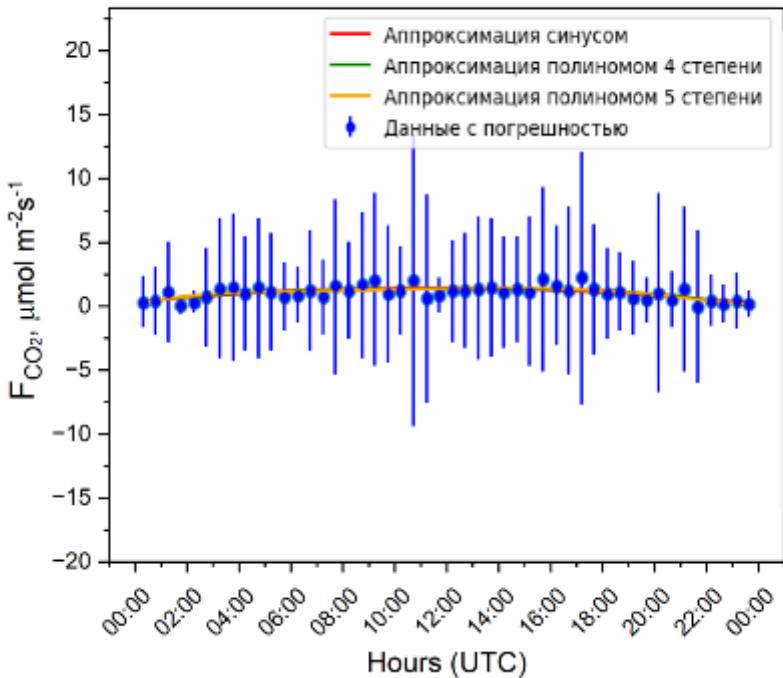


Рисунок 36 – Средний суточный ход F_{CO_2} для января 2024 г.

Анализ значений коэффициента детерминации (R^2), характеризующих качество аппроксимирующей модели, в нашем случае показал, что полином 5-ой степени имеет максимальные значения R^2 для всех месяцев в сравнении с полиномом 4-ой степени и синусоидальной зависимостью. Используя выбранную нами аппроксимацию полиномом 5-ой степени, для всех 12 месяцев были определены значения суточного минимума и максимума F_{CO_2} , установлено характерное время, когда наблюдаются экстремальные значения, а также оценен размах суточного хода (Таблица 23).

Таблица 23. Значения максимумов и минимумов, а также размаха среднего суточного хода F_{CO_2} . В скобках указано время, когда наблюдаются соответствующие минимальные и максимальные значения.

Месяц	Max F_{CO_2} , мкмоль· $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Min F_{CO_2} , мкмоль· $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Max F_{CO_2} – Min F_{CO_2} , мкмоль· $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
Август 23	4.46 (20:00)	-1.81 (10:00)	6.27
Сентябрь 23	3.11 (21:00)	0.23 (10:00)	2.88
Октябрь 23	3.47 (13:00)	0.79 (00:00)	2.68
Ноябрь 23	3.38 (13:00)	0.71 (00:00)	2.67
Декабрь 23	5.92 (12:00)	1.1 (00:00)	4.82
Январь 24	1.8 (14:00)	0.53 (00:00)	1.27
Февраль 24	2.78 (13:30)	-0.08 (00:00)	2.86
Март 24	2.95 (10:30)	0.7 (22:00)	2.25

Апрель 24	1.89 (09:30)	0.45 (23:30)	1.44
Май 24	2.09 (18:00)	0.56 (08:00)	1.53
Июнь 24	1.55 (20:30)	-2.37 (09:30)	3.92
Июль 24	2.29 (19:00)	-1.88 (09:00)	4.17

По результатам, представленным в Таблице 23 видно, что максимальная амплитуда суточного хода F_{CO_2} наблюдается преимущественно в период с июня по август. Для этого периода суточные максимумы F_{CO_2} наблюдаются в вечернее и ночное время, также обратим внимание, что они имеют положительные значения. Минимумы наблюдаются в дневное время, достигая отрицательных значений, что обусловлено поглощением CO_2 вегетирующими растениями. Для сентября и мая максимумы суточного хода F_{CO_2} наблюдаются, также, как и для летних месяцев, в вечернее время, а минимумы в дневное. Отличие состоит в том, что минимумы больше не принимают отрицательных значений, что связано с замедлением процессов фотосинтеза. Для остальных месяцев (с октября по апрель) суточные максимумы регистрируются в дневное время; минимумы – в ночное, при этом они не принимают отрицательных значений.

Рассмотрим средние значения потоков CO_2 за каждый месяц совместно со среднемесячными метеоданными по температуре, направлению и скорости ветра (Таблица 24).

Таблица 24. Среднемесячные значения: F_{CO_2} (\pm ошибка среднего), температура, направление и скорость ветра.

Месяц	F_{CO_2} , МКМОЛЬ· $m^{-2} \cdot s^{-1}$	T, °C	Направление ветра	Скорость ветра, (м/с)
Август 2023	2.7±0.2	18.5	ВСВ	2.3
Сентябрь 2023	2.23±0.08	17.2	ЮЮЗ	2.6
Октябрь 2023	2.56±0.08	11.8	ВЮВ	3.2
Ноябрь 2023	2.44±0.08	3.0	ЮЮЗ	2.4
Декабрь 2023	4.3±0.2	-10.5	ВЮВ	2.2
Январь 2024	1.44±0.08	-6.3	ЮЗ	2.8
Февраль 2024	1.88±0.09	-5.0	ЮЮВ	2.8
Март 2024	1.75±0.09	1.9	ЮЗ	2.4
Апрель 2024	1.40±0.08	5.7	ВСВ	3.1
Май 2024	1.3±0.1	13.7	ВСВ	2.3
Июнь 2024	0.2±0.1	18.9	3	2.4
Июль 2024	0.5±0.1	20.3	ЗЮЗ	2.2

Из данных, представленных в Таблице 24 видно, что, в среднем, в холодные месяцы наблюдаются более высокие уровни F_{CO_2} с более низкими значениями ошибки среднего. Из всего массива среднемесячных значений выделяется декабрь 2023 года, когда были

получены F_{CO_2} на уровне ~ 4.3 мкмоль· $m^{-2} \cdot s^{-1}$. Рассмотрение суточного хода для декабря 2023г. (Рисунок 37) показывает, что не только абсолютные средние значения потока CO_2 , но и амплитуда суточного хода F_{CO_2} , которая составила ~ 4.8 мкмоль· $m^{-2} \cdot s^{-1}$ (Таблица 23) имеют высокие значения относительно остальных месяцев. Такое резкое увеличение значений F_{CO_2} в декабре, предположительно, объясняется низкой среднемесячной температурой, которая составила -10.5 °C (Таблица 24), что заметно меньше аналогичных значений для января (-6.3 °C) и февраля (-5.0 °C) 2024 года. Понижение температуры воздуха могло привести к увеличению интенсивности антропогенной эмиссии CO_2 от таких источников, как автотранспорт и здания СПбГУ. Ближайшая автодорога с кольцевой остановкой автобусов расположена к востоку от места установки измерительной аппаратуры Eddy Covariance System, что, при наблюдавшихся в декабре преимущественных ветрах В-ЮВ направления (Таблица 17 и розу ветров для декабря 2023 года, представленную на Рисунке 38) могло стать причиной зафиксированного нами значительного роста потока CO_2 .

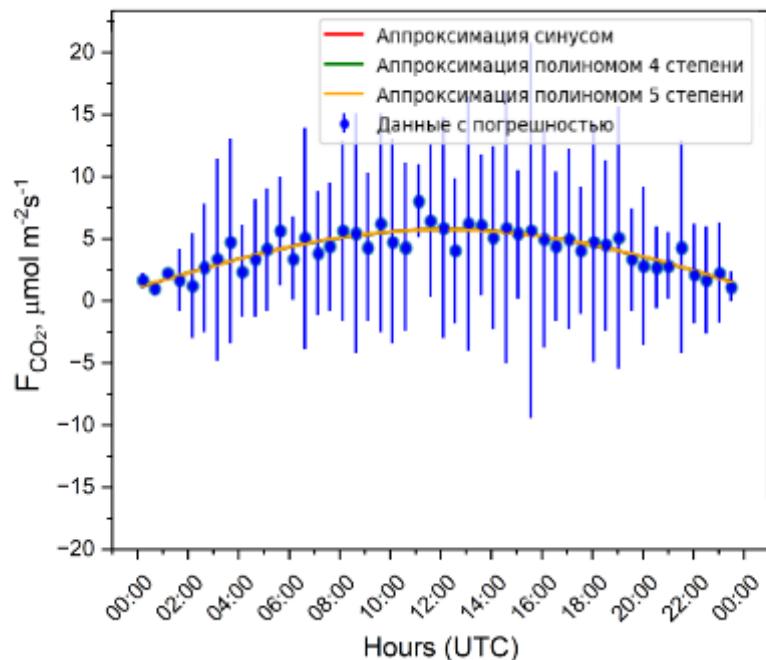


Рисунок 37 – Суточный ход F_{CO_2} для декабря 2023 г.

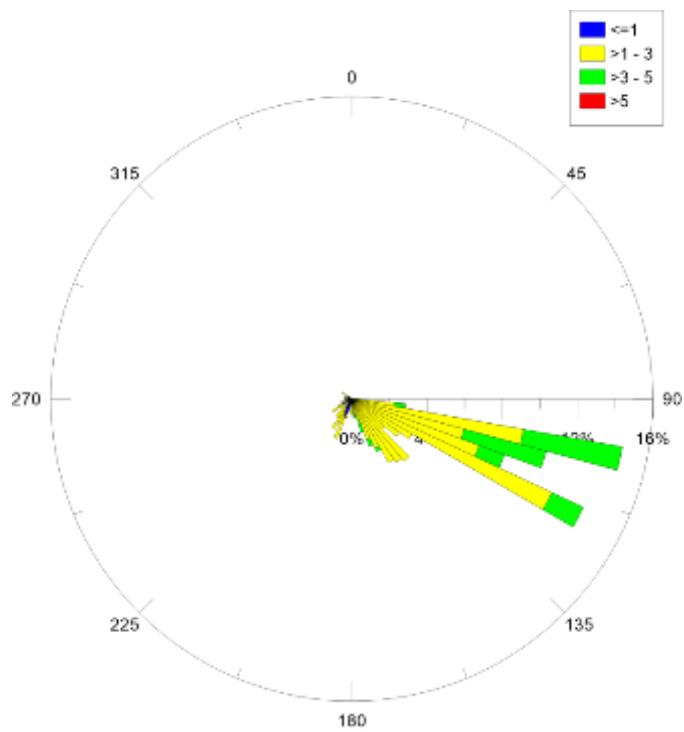


Рисунок 38 – Роза ветров за декабрь 2023г.

Для летних месяцев мы ожидаем более низкое среднее значение потоков CO₂ и выраженный суточный ход F_{CO2} с характерными для летних месяцев дневными минимумами (растительность под действием солнечного излучения активно поглощает углекислый газ в дневное время). Это подтверждается результатами, полученными для июня и июля, менее однозначная картина наблюдалась в августе 2023 года. Рисунок 39 демонстрирует наличие минимума F_{CO2} на уровне 1.81 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ около полудня (по UTC) – это значение согласуется с июльским суточным минимумом, составляющим 1.88 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. С другой стороны, ночной максимум 4.46 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ для августа значительно выше соответствующих июльских (2.29 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) и сентябрьских (3.11 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) значений. Таким образом, можно заключить, что, во-первых, вид среднего суточного хода F_{CO2} и его значения в минимуме для августа соответствует летним месяцам (период вегетации) и, во-вторых, наблюдались высокие значения потока CO₂ в вечерний и ночной период. Данные о преобладающих направлениях ветра за август 2023г. представленные на Рисунок 39, показали, что, как и для декабря 2023 г., преимущественное направление ветра – восточное (В-СВ). Кроме уже указанных нами ранее местных источников CO₂, расположенных к востоку от измерительной станции, вероятно, можно допустить, что на наши пульсационные наблюдения в определенных условиях могут оказывать влияние мощные, но существенно более дальние (находящихся за пределами

зоны 100% охвата, составляющей по теоретическим оценкам ~ 4 км) источники эмиссии CO₂, относящиеся к Санкт-Петербургской агломерации.

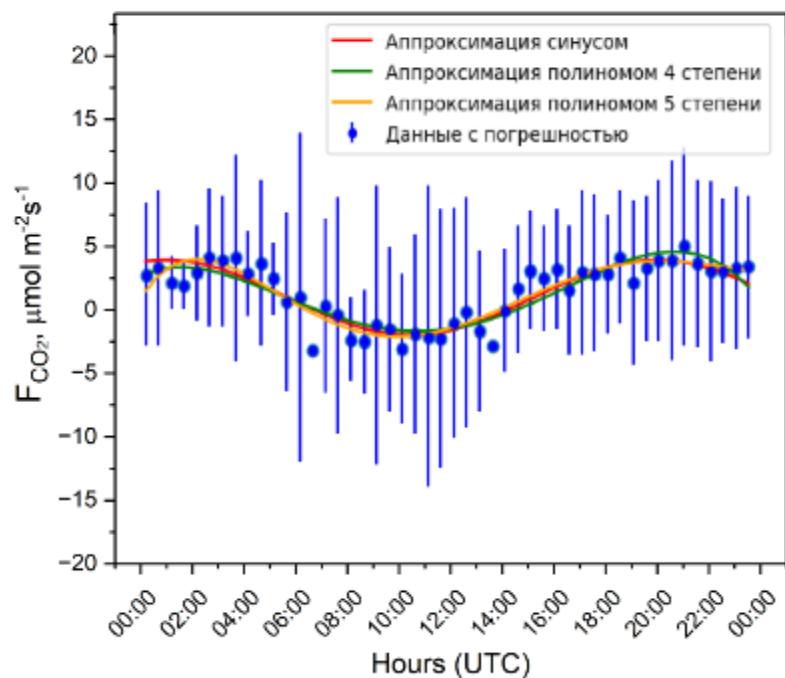


Рисунок 38 – Суточный ход F_{CO₂} для августа 2023 г.

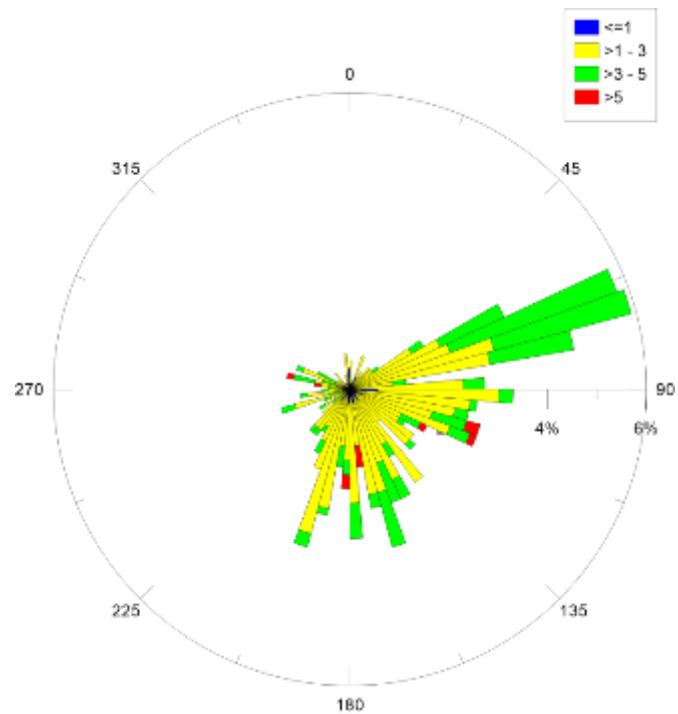


Рисунок 39 – Роза ветров за август 2023 г.

По результатам анализа пульсационных измерений потока CO₂, проведенных на станции атмосферного мониторинга СПбГУ (Pet) в течение первого тестового года (август 2023 г. – июль 2024 г.), было получено:

- среднегодовое значение потока CO₂ за исследуемый период составило 2.4 ± 0.5 кт·км⁻²·год⁻¹, что хорошо совпадает как с более ранними нашими оценками, полученными для станции Pet методом баланса масс в условияхочных накоплений (6 ± 4 кт·км⁻²·год⁻¹), так и с результатами независимых исследований;

- средние значения потока CO₂ для «летнего» (апрель–октябрь) и «зимнего» (ноябрь–март) сезонов составили (1.63 ± 0.30) кт·км⁻²·год⁻¹ и (1.94 ± 0.49) кт·км⁻²·год⁻¹, соответственно;

- суточный ход F_{CO2} имеет сезонные различия, обусловленные изменениями источников и стоков CO₂. Для периода с июня по август суточные максимумы F_{CO2} наблюдаются в вечернее и ночное время, минимумы наблюдаются в дневное время, достигая отрицательных значений, что обусловлено поглощением CO₂ вегетирующими растениями. Для сентября и мая максимумы суточного хода F_{CO2} наблюдаются, также как и для летних месяцев, в вечернее время, а минимумы в дневное. Отличие состоит в том, что минимумы больше не принимают отрицательных значений, что связано с замедлением процессов фотосинтеза. Для периода с октября по апрель суточный ход противоположный – суточные максимумы регистрируются в дневное время; минимумы – в ночное, при этом они не принимают отрицательных значений.

- оценки потоков CO₂ от автотранспорта для «зимнего» и «летнего» периодов для нашей станции составила 0.78 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ и 1.49 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, соответственно;

- значение удельного стока CO₂, связанного с фотосинтетической активностью растительных массивов, расположенных вблизи нашей станции составляет 0.76 ± 0.13 кгС·м⁻²·год⁻¹, что хорошо согласуется с результатами оценок валовой первичной продукции (0.81 кгС·м⁻²·год⁻¹), полученных для территории Ленинградской области с использованием данных спутниковой аппаратуры ОСО-2.

6.2 Разработка и тестирование оптимальной методики определения интегрального содержания CO₂ в атмосфере по данным ИК наземного дистанционного зондирования

Исследования антропогенного влияния на процессы, происходящие в различных геосферах и, в частности, в атмосфере, ведутся уже на протяжении нескольких десятилетий, не теряя своей актуальности. Деятельность человека вносит существенный вклад или полностью определяет такие явления, наблюдаемые в настоящее время атмосфере, как глобальные климатические изменения и ухудшение качества атмосферного воздуха. Обе проблемы, имеющие существенное влияние на здоровье и качество жизни людей,

связываются с антропогенными выбросами в атмосферу большой номенклатуры веществ в различных фазовых состояниях – газовой, жидкокапельной и твердой. Согласно современным представлениям, текущие изменения климата Земли в значительной степени обусловлены ростом содержания долгоживущих климатически активных или так называемых парниковых газов в атмосфере: углекислого газа (CO_2), метана (CH_4), закиси азота (N_2O), гексафторида серы (SF_6), водорода (H_2), хлорфтоглеродов и гидрофтоглеродов [174-176]. На долю трех ключевых долгоживущих парниковых газа – CO_2 , CH_4 и N_2O – приходится ~88% вклада (66% - CO_2 , 16% - CH_4 и 6% - N_2O) в увеличение глобального радиационного воздействия с доиндустриального периода до 2023 года [176]. С 1990 по 2023 год радиационное воздействие парниковых газов увеличилось на 51.5%, причем около 81% этого увеличения приходится на CO_2 [177]. Анализ последних данных сети наблюдений GAW WMO показал, что концентрации CO_2 , CH_4 и N_2O в атмосфере продолжают свой рост, достигая новых рекордных значений: средние глобальные концентрации парниковых газов, наблюдавшиеся в 2023 году, составили 420.0 ± 0.1 ppmv, 1934 ± 2 ppbv и 336.9 ± 0.1 ppbv для CO_2 , CH_4 и N_2O соответственно [176]. Основной массив экспериментальной информации о содержании и потоках климатически и химически активных газов в глобальном масштабе обеспечивается:

- мировыми измерительными сетями: GAW WMO (Global Atmosphere Watch World Meteorological Organization); GML NOAA (Global Monitoring Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration); TCCON (Total Carbon Column Observing Network; COCCON, Collaborative Carbon Column Observing Network); NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change); ICOS (<https://www.icos-cp.eu/>); AmeriFlux (<https://ameriflux.lbl.gov/>);
- спутниковыми системами глобального мониторинга: Greenhouse gases Observing SATellite, GOSAT, <https://www.gosat.nies.go.jp>; Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI, <https://www.eumetsat.int/iasi>; The Orbiting Carbon Observatory 2/3, OCO-2/3, <https://ocov2.jpl.nasa.gov> and <https://ocov3.jpl.nasa.gov>; TROPOspheric Monitoring Instrument, TROPOMI, <https://www.tropomi.eu>, и др.

Подчеркнем, что наблюдения наземных сетей TCCON, COCCON и NDACC, осуществляющих наземные долговременные программы по дистанционному FTIR-мониторингу (FTIR, Fourier Transform InfraRed) газового состава атмосферы, являются ключевым элементом проверки точности спутниковых измерений количественных характеристик газового состава атмосферы [178-181]. В России осуществляется мониторинг парниковых газов, однако состояние наземной измерительной сети, в целом, имеет отставание от принятого международного уровня как по количеству станций, так и

по их материально-техническому и методическому обеспечению. Функционирующие в нашей стране станции мониторинга парниковых газов принадлежат различным институтам (ГГО им. А.И.Воейкова, ИГКЭ им. Ю.А. Израэля, НПО “Тайфун”, ААНИИ, СПбГУ, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, ИФА им. А.М. Обухова РАН, СПбГУ) и к настоящему времени не объединены в национальную сеть с единым методическим и метрологическим обеспечением. Сложившаяся ситуация приводит к дефициту достоверных исходных данных и, следовательно, к неопределенности в существующих прогнозах изменений климата в России на ближайшее столетие. Подчеркнем, что только две российские организации – Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова и СПбГУ – успешно провели международную сертификацию своих систем наблюдений климатически важных газов, тем самым обеспечив сопоставимость с результатами глобальных измерительных сетей GAW WMO (<https://wmo.int/activities/global-atmosphere-watch-programme-gaw>) и NDACC (<https://ndacc.larc.nasa.gov/>), соответственно. В этой связи важной задачей является развитие и совершенствование методов высокоточного мониторинга содержания парниковых газов в атмосфере, и, в особенности, CO₂, для различных климатических и географических условий на территории России.

Характеристика географического положения станции атмосферного мониторинга СПбГУ (STP, 59.88° с.ш., 29.83° в.д., 20 м над уровнем моря) и подробное описание FTIR-комплекса (состоит из Фурье-спектрометра Bruker IFS 125HR и системы слежения за солнцем), использующегося с 2009 года для высокоточного комплексного мониторинга газового состава атмосферы согласно требованиям сейдународной сети NDACC, было дано в отчете 2024 года. Наземный FTIR-мониторинг газового состава атмосферы основан на регистрации ИК спектров прямого солнечного излучения, прошедших через толщу атмосферы, и осуществляется в условиях безоблачного неба или, когда облачность имеет разрывы в облачности, достаточные для регистрации единичного спектра. Типичные настройки FTIR-комплекса СПбГУ, используемые при регистрации спектров прямого солнечного излучения в диапазоне 1700-5400 см⁻¹ с использованием приемника излучения InSb (Indium Antimonide), приведены в Таблице 25. Эти настройки зависят от устанавливаемого нами при измерениях оптического фильтра (F1 или F2). Для достижения более высокого отношения сигнал/шум (SNR) в спектре проводится процедура накопления интерферограмм с последующим их усреднением. Количество сканирований для большинства атмосферных FTIR-измерений на станции СПбГУ устанавливается равным 8-10. Для наблюдений, которые проводятся в условиях переменной облачности и/или при большом значении SZA (при низком Солнце), количество сканирований может быть

сокращено до 4-6. Примеры ИК спектров прямого солнечного излучения, зарегистрированных с использованием оптических фильтров F1 и F2, представлены на Рисунке 40.

Таблица 25. Типичные настройки FTIR-комплекса СПбГУ для атмосферных измерений в среднем ИК диапазоне спектра.

Настройки FTIR-комплекса	Оптический фильтр	
	F1	F2
Тип приемника излучения	InSb (Indium Antimonide), охлаждаемый жидким азотом	
Тип оптического делителя	KBr	
Размер апертуры, мм	0.8 – 1.3	
Спектральное разрешение $\Delta\nu$, см^{-1} (OPD, см)	0.005 (180)	
Регистрируемый спектральный интервал (интервал пропускания), см^{-1}	2350 – 5400	1700 – 3400
Количество сканов в одном спектре	4-10	

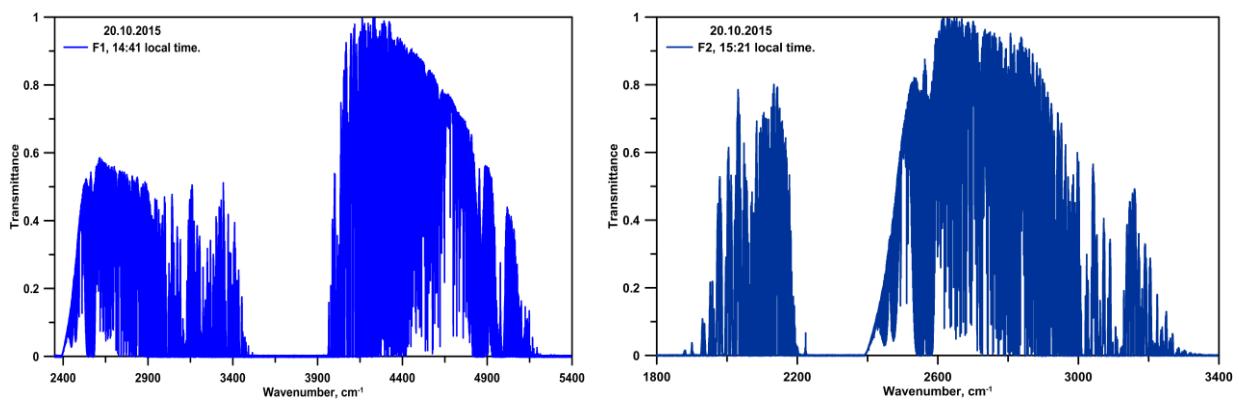


Рисунок 40 – Примеры ИК спектров прямого солнечного излучения, зарегистрированные 20 октября 2015г. с использованием оптических фильтров F1 (A) и F2 (B)

В применении к наземным FTIR-измерениям решение некорректной обратной задачи дистанционного зондирования атмосферы предполагает получение количественной информации об общем содержании (total column, TC) и/или вертикальном профиле объемной концентрации (volume mixing ratio, VMR) исследуемого газа в атмосфере по ИК-спектрам прямого солнечного излучения. С физической точки зрения восстановление вертикального профиля газа (в нашем случае, CO₂) возможно благодаря зависимости

формы спектральных линий от вертикальных профилей температуры и давления в атмосфере.

Для CO₂ наряду с общим содержанием TCCO₂ часто используется величина XCO₂ – средневзвешенная концентрация CO₂ в толще атмосферы, которая менее подвержена вариациям, связанным с изменениями атмосферного давления. XCO₂ рассчитывается по следующей формуле [182-183]:

$$X_{CO_2} = TCCO_2 / TC_{dry_air} \quad (7)$$

$$TC_{dry_air} = (0.2095 \cdot P_s / g(\varphi) - TCH_2O \cdot mH_2O) / m_{dry_air} \quad (8)$$

где, T_{cdry_air} – общее содержание всех молекул воздуха в сухой атмосфере (молек./см²); m_{dry_air} – молекулярная масса сухого воздуха (28.964 г/моль); mH_2O – молекулярная масса H₂O (18.02 /моль); P_s – приземное давление (гПа), которое берется из входных данных NCEP; $g(\varphi)$ – ускорение свободного падения (зависящее от широты); TCH_2O – общее содержание водяного пара (также является результатом обработки FTIR-спектров, но в других спектральных интервалах, традиционно используемых при определении TCH_2O).

При оценке эффективности методики определения TCCO₂ (XCO₂) по FTIR-спектрам конкретный набор используемых критериев/функций находится в зависимости от решаемых задач. Обычно при выборе наиболее перспективной методики могут применяться следующие целевые критерии/функции, характеризующие качество решения обратной задачи атмосферной оптики [184-185]:

а) δ_{sys} и δ_{rand} - случайная и систематическая погрешности определения содержания газа в атмосфере;

б) RMS (Root mean square) – значение среднеквадратического рассогласования между измеренным и рассчитанным спектрами. Данный критерий характеризует согласие между расчетным и измеренным спектрами, достигнутое при решении обратной задачи;

в) DOFS (Degrees of freedom for signal) – количество степеней свободы, т. е. независимо восстанавливаемых элементов вертикального профиля газа в атмосфере. Значение DOFS характеризует, может ли быть определено общее содержание (при $DOFS \geq 1.0$) или также элементы вертикального распределения газа в атмосфере (при $DOFS \geq 2.0$);

г) минимум вариации TCGAS (XGAS) в течение дня (σ_{TCGAS} и/или σ_{XGAS}). Такой критерий часто применяется для долгоживущих парниковых газов, (например, CO₂), для которых не характерны сильные изменения атмосферного содержания в течение дня.

В некоторых случаях в качестве дополнительного критерия также используют критерий однородности χ^2 .

Полученные результаты должны иметь физический смысл: например, методика (также иногда называемая стратегией восстановления), оптимальная с точки зрения критериев, перечисленных в пунктах (а-г), но дающая в результате решения обратной задачи атмосферной оптики неадекватные результаты, например, форму вертикального распределения газа, противоречащую результатам независимых измерений (сильно осциллирующий профиль или профиль с отрицательными концентрациями в определенных атмосферных слоях), не может рассматриваться как оптимальная.

На первом этапе исследования были сформированы возможные варианты методик восстановления ТССО₂ (ХСО₂) по FTIR-спектрам прямого солнечного излучения. В Таблице 26 представлена информация о четырех методиках, которые были выбраны нами в качестве базовых при разработке оптимальной стратегии восстановления СО₂ для станции атмосферного мониторинга СПбГУ. Первые три стратегии «2600», «3100» и «3300» были заимствованы из литературных источников, четвертая «4880» – оригинальная разработка, осуществленная нами в рамках данного проекта. Далее были сформированы комбинированные методики на основе двух, трех или четырех базовых, например, используемое нами далее обозначение «2600_3100_3300_F1» означает, что данная комбинация трех базовых методик «2600», «3100» и «3300» применяется для обработки спектров, зарегистрированных с оптическим фильтром F1. Отметим, что все спектральные интервалы комбинированных методик должны входить в область спектрального пропускания одного оптического фильтра (либо F1, либо F2). Как следует из информации, представленной в колонке 2 Таблица 26, методика «4880» и ее комбинации с другими базовыми методиками реализуемы только для спектров, зарегистрированных с оптическим фильтром F1. Таким образом, для спектров, записанных с использованием оптического фильтра F2, реализуемы 7 вариантов методик определения ТССО₂ (ХСО₂) в атмосфере, для фильтра F1 – 15.

Таблица 26. Информация о базовых методиках, используемых при разработке оптимальной стратегии восстановления СО₂ для станции атмосферного мониторинга СПбГУ (STP).

Наименование методики (ссылка)	Оптич. фильтр	Спектральные интервалы, см ⁻¹	Мешающие (восстанавл.)	Тип регуляризации	Входная и априорная информация
-----------------------------------	---------------	--	------------------------	-------------------	--------------------------------

			иваемые) компоненты		
«2600» [183]	F1,F2	2620.55 – 2621.10 2626.40 – 2626.85 2627.10 – 2627.60 2629.275 – 2629.95	H ₂ O, HDO, CH ₄	TP-L1($\alpha=10000$)	Спектральная база данных HITRAN (различных версий), априорные профили газов в атмосфере – результаты расчетов модели WACCM v.6, профили p(z) и T(z) – данные NCEP
«3100» [186]	F1,F2	3160.14 – 3160.30 3161.60 – 3161.80	H ₂ O, O ₃ , CH ₄		
«3300» [186]	F1,F2	3315.505 – 3316.055 3344.62 – 3344.94	H ₂ O, C ₂ H ₂ , N ₂ O, HCN		
«4880» (настоящее исследование)	F1	4484.90 – 4488.40	CO ₂ , O ¹³ CO, CO ¹⁸ O, CH ₄		

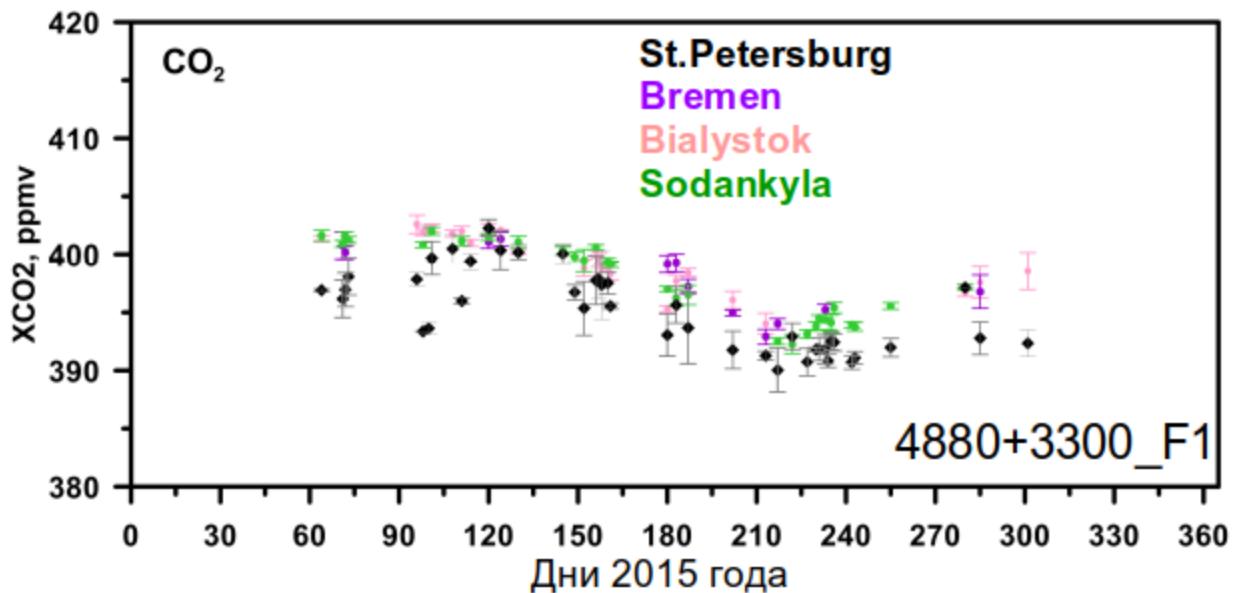
На втором этапе было проведено тестирование всех 22 вариантов методик на массиве спектров, зарегистрированных с оптическими фильтрами F1 и F2 в 2015 году – это традиционно используемый нами период с самым большим количеством единичных измерений на станции STP за все время наблюдений с 2009г. по 2024г. При этом одновременно осуществлялась необходимая адаптация стратегий восстановления с учетом географических и погодно-климатических особенностей нашей станции, а также специфики измерительного FTIR-комплекса СПбГУ. Анализ полученных результатов с учетом перечисленных выше критериев (а-г) позволил нам из 22 вариантов отобрать 4 наиболее перспективных методики, информация о которых которых приведена в Таблице 27. В данной таблице указаны средние значения (за 2015 год) следующих величин: случайная и систематические погрешности (δ_{rand} и δ_{sys}), значение среднеквадратического рассогласования между измеренным и рассчитанным спектрами (RMS), количество независимо восстанавливаемых элементов вертикального профиля CO₂ атмосфере и тропосфере (DOFS и DOFS_trp), значение средневзвешенной концентрации CO₂ (X_{CO2}) и ее дневная изменчивость (σX_{CO2}). Величины δ_{rand} , δ_{sys} , RMS, DOFS и DOFS_trp, σX_{CO2} , соответствующие критериям (а-г), использовались нами для определения оптимальности методик следующим образом: красным и синим цветом в таблице выделены значения, обеспечивающие первые два лучших результата соответствующего критерия. Затем нами суммировалось количество баллов (оно указано в первой колонке Таблице 27), набранных каждой методикой: за «красное значение» начислялся 1 балл, за «синее» — 0.5 балла [185].

Таблица 27. Результаты, полученные при тестировании наиболее перспективных методик определения TCCO₂ (XCO₂) по FTIR-спектрам прямого солнечного излучения

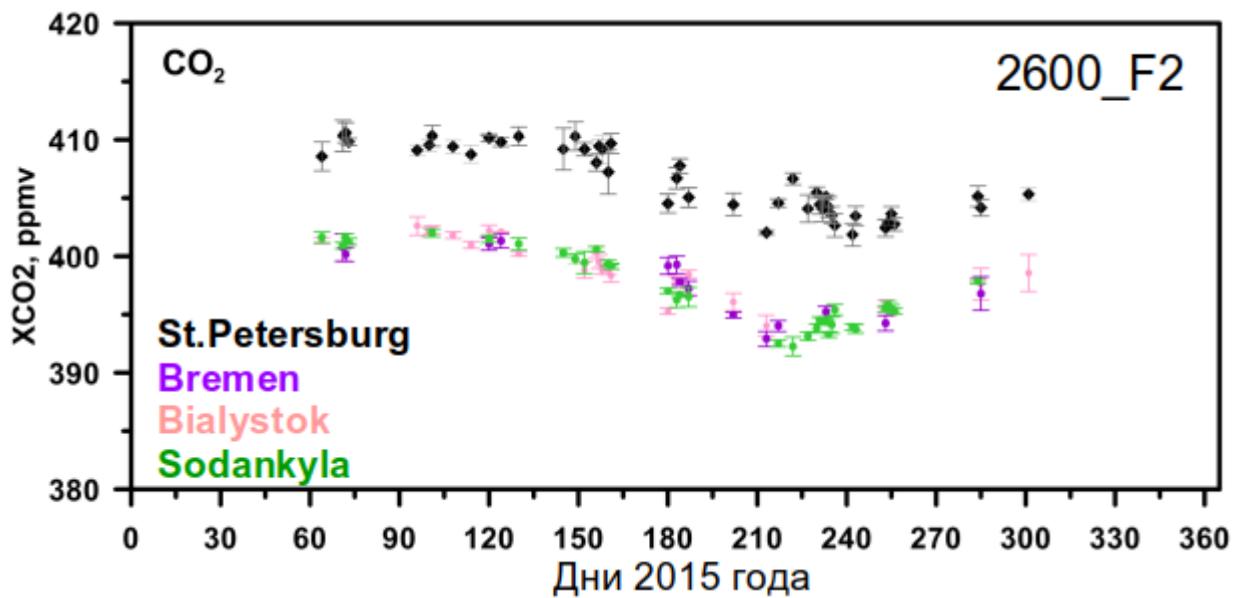
Методика (баллы)	$\delta_{\text{rand}}, \%$	$\delta_{\text{sys}}, \%$	RMS, %	DOFS/DOFS_trp	X _{CO₂} , ppmv	$\sigma X_{\text{CO}_2}, \text{ppmv}$
«2600_F2» (2.5)	2.4	5.2	0.15	1.4±0.2/0.6	406.8	0.8
«4880+3300_F1» (3)	2.1	3.9	0.33	2.2±0.2/1.2	395.4	1.1
«3300_F1» (1)	2.1	5.7	0.34	1.8±0.2/0.8	400.6	1.9
«4880_F1_180» (1)	2.7	6.0	0.37	2.5±0.1/1.2	405.2	1.4

Подводя итоги второго этапа исследования: было получено, что наиболее перспективными для нашей FTIR-станции являются стратегии восстановления «4880+3300_F1» и «2600_F2».

Третий этап заключался в сравнении значений X_{CO₂}, полученных с использованием методик «4880+3300_F1» и «2600_F2» за 2015 год с результатами международной сети станций FTIR-мониторинга TCCON. Значения, получаемые на данной сети являются своего рода «эталоном» FTIR-измерений X_{CO₂} и используются для валидации наземных и спутниковых измерений CO₂ в толще атмосферы. Для сравнения нами были выбраны следующие наиболее близко расположенные к STP станции TCCON: Bremen (53.10° с.ш., 8.85° в.д., 27 м над уровнем моря), Bialystok (53.23° с.ш., 23.025° в.д., 180 м над уровнем моря) и Sodankyla (67.37° с.ш., 26.63° в.д., 188 м над уровнем моря). Результаты этого сравнения представлены на Рисунке 41, где даны ряды среднедневных значений X_{CO₂} для нашей станции (указана на рисунке как St.Petersburg) и трех выбранных станций TCCON за 2015 год. Значения коэффициента корреляции (r) для совпадающих дней измерений и уровень систематического сдвига ($dX_{\text{CO}_2}, \text{ppmv}$) были рассчитаны нами для парных массивов среднедневных значений X_{CO₂} STP-Bremen, STP- Bialystok и STP-Sodankyla, результаты представлены в Таблице 28.



A



B

Рисунок 41 – Ряды среднедневных значений ХСО₂ за 2015 год для станций Bremen, Bialystok и Sodankyla (измерительная сеть TCCON) в сравнении с результатами нашей станции (указана на рисунке как St.Petersburg), полученными с использованием: А) методики «4880+3300_F1», В) методики «2600_F2»

Таблица 28 – Значения коэффициента корреляции r для совпадающих дней измерений и уровень систематического сдвига dX_{CO_2} для парных массивов среднедневных значений X_{CO_2} STP-Bremen, STP- Bialystok и STP- Sodankyla за 2015 год

Станции	r	dX_{CO_2} , ppmv
---------	-----	--------------------

	«2600_F2»	«4880+3300_F1»	«2600_F2»	«4880+3300_F1»
STP-Bremen	0.88	0.87	8.8 ± 1.4	-3.1 ± 1.9
STP- Bialystok	0.86	0.64	8.2 ± 1.4	-3.2 ± 2.4
STP- Sodankyla	0.84	0.86	9.2 ± 1.7	-2.7 ± 1.8

Результаты сравнения показывают:

- наиболее высокие значения коэффициента корреляции r получены для XCO_2 стратегии «2600_F2»;
- наименьшее систематическое рассогласование $d\text{XCO}_2$ характерно для «4880+3300_F1».

Систематические сдвиги в рядах XCO_2 , полученных с использованием различных спектральных интервалов (методика TCCON использует отличные от наших спектральных интервалов в ближней ИК области) обусловлены систематическими погрешностями входной спектроскопической информации, используемой при обработке FTIR-спектров. Такая систематика обычно достаточно легко учитывается при анализе данных. Поэтому ориентируясь на более высокие значения r , полученные для стратегии восстановления «2600_F2», можно заключить, что на данный момент (при имеющемся оборудовании) именно эта методика является оптимальной для нашей станции.

Здесь необходимо также подчеркнуть, что в настоящий момент отношение сигнал/шум для FTIR-спектров прямого солнечного излучения в диапазоне $\sim 2600 \text{ cm}^{-1}$, регистрируемых с использованием фильтра F2, примерно в 1.5-2 раза выше по сравнению со спектрами в диапазонах $\sim 4880 \text{ cm}^{-1}$ и $\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$ (фильтр F1). Поэтому при условии повышения отношения сигнал/шум в диапазоне $3300-4900 \text{ cm}^{-1}$, что возможно при использовании более узкополосного фильтра (по сравнению с F1), делителя CaF_2 и приемника излучения InGaAs, методика «4880+3300_F1» имеет перспективы к дальнейшему улучшению результатов определения TCCO_2 (XCO_2) в атмосфере.

Исследования, проведенные с целью разработки оптимальной методики определения интегрального содержания CO_2 в атмосфере по данным наземного дистанционного зондирования в среднем ИК диапазоне, показали:

- на основе тестирования 22 вариантов методик определения TCCO_2 (XCO_2) в атмосфере по FTIR-спектрам прямого солнечного излучения, получено, что наиболее перспективными для нашей FTIR-станции являются стратегии восстановления «4880+3300_F1» и «2600_F2», которые основаны на использовании следующих спектральных интервалов: $3315.505 - 3316.055$, $3344.62 - 3344.94$, $4484.90 - 4488.40 \text{ cm}^{-1}$ и

2620.55 – 2621.10, 2626.40 – 2626.85, 2627.10 – 2627.60, 2629.275 – 2629.95 см⁻¹, соответственно;

- сравнения с результатами независимых измерений XCO₂ на ближайших станциях TCCON показали, что значения коэффициента корреляции выше для методики «2600_F2». Таким образом, данная методика является оптимальной для нашей станции (с учетом специфики аппаратуры и погодно-климатических условий);

- при условии повышения отношения сигнал/шум в диапазоне 3300-4900 см⁻¹ методика «4880+3300_F1» имеет перспективы к дальнейшему улучшению результатов определения TCCO₂ (XCO₂) в атмосфере.

7 Содержание аэрозолей в атмосфере Балтийско-Ладожского региона

7.1 Лидарные технологии для мониторинга аэрозольных частиц в атмосфере

Без четкого понимания происходящих геохимических, химических и биогеохимических процессов в климатической системе невозможно точно описать текущие и будущие процессы изменения климата и разработать системы ослабления возможных негативных последствий данных изменений. Вследствие развития промышленности, увеличения числа автотранспорта существенно возрастают объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, среди них метан, оксиды азота, аэрозольные частицы, углекислый газ,monoоксид углерода, озон, различные углеводороды. Все эти компоненты, находясь в атмосфере, участвуют в сложных физико-химических процессах, что приводит к изменению естественных биогеохимических циклов. Данные изменения могут приводить как к усилению, так и ослаблению трансформаций экосистем в результате антропогенной деятельности [32].

Отсутствие полной информации о пространственно-временной изменчивости содержания аэрозолей в атмосфере создает неопределенность и трудности в оценке степени их воздействия аэрозольных частиц на изменение состояния окружающей среды. Сильная неоднородность в распределении аэрозолей по размерам и составу в разных регионах, зависит от имеющихся в регионе источников загрязнений, которые оказывают влияние на погоду и циркуляцию воздушных масс атмосферы, в том числе за сотни и тысячи км от места их образования.

В настоящее время большое количество публикаций посвящено изучению малых газов, при этом атмосферный аэрозоль является не менее важной составляющей и регулятором атмосферных процессов. Аэрозоли влияют на процессы образования осадков и облаков, а также на перенос солнечной и тепловой радиации в атмосфере, что ведет к изменению температурного режима. Климатический эффект аэрозолей зависит от

физического и химического свойства аэрозолей, их количества, а также от высоты нахождения аэрозольного слоя [32,33]. Основная роль аэрозолей в прохождении физических и физико-химических процессов в атмосфере обусловлена: фазовыми переходами воды при образовании облаков и туманов; влиянием на радиационный баланс атмосферы, ввиду сильнейшего воздействия пылевых облаков на изменения температурного режима атмосферы и поверхности Земли; гетерогенными каталитическими химическими и фотохимическими реакциями; массопереносом твердого вещества и воды [33].

Влияние аэрозолей на глобальный и региональный климат происходит из-за изменения переноса коротковолновой и длинноволновой радиации. Региональные и глобальные климатические и метеорологические изменения происходят, в первую очередь, при крупных пылевых переносах (например, перенос песка из пустыни Сахара), крупных пожарах, крупных производственных выбросах.

Выделяется прямое и косвенное воздействие аэрозолей. Прямое воздействие аэрозолей определяется их способностью рассеивать и поглощать тепловую и солнечную радиацию, что ведет к изменению радиационного баланса атмосферы и подстилающей поверхности. В пограничном слое атмосферы происходит интенсивный обмен с поверхностью энергией и веществом, возникают особые условия динамического режима. При наличии источников выбросов аэрозолей, безветренная погода увеличивает концентрацию аэрозолей. Высокое содержание аэрозольных частиц, в основном сажи увеличивает поглощение солнечной радиации, что приводит к возрастанию приземной температуры [187].

Косвенное воздействие аэрозолей связано с их влиянием на радиационные свойства облаков и их время нахождения в атмосфере. Включение антропогенных аэрозолей в структуру облака приводит к тому, что тонкие стратосферные облака выхолаживают атмосферу. При этом включение аэрозолей в толстые кучевые облака, делает их темнее и это приводит к нагреванию приземного слоя атмосферы. Также стоит отметить влияние аэрозолей на содержание воды в облаках, высоту их расположения и время их жизни [188].

Определяющее значение для выявления опасных тенденций и процессов, понимания климатических изменений имеет изучение состояния атмосферы над урбанизированными территориями и вблизи них. Антропогенный аэрозоль влияет на замутненность атмосферы и наличие аэрозольной дымки. При протекании гетерогенных каталитических химических реакций на поверхности аэрозольных частиц происходит выведение газовых примесей из атмосферы. На аэрозольных частицах почвенного происхождения и ледяных частицах происходит разрушение озона в атмосфере полярных регионов [34].

В связи с активной антропогенной деятельностью происходит постоянное изменение содержания и состава аэрозольной компоненты в атмосфере, что требует выявления опасных тенденций процессов загрязнения и является важной задачей мониторинга атмосферы.

Следует отметить опасность, которую представляет загрязнение аэрозольными частицами для окружающей среды. Проникновение аэрозольных частиц в дыхательную систему приводит к серьезным нарушениям здоровья человека. Согласно докладу ВОЗ, от загрязнения воздуха ежегодно умирает около 7 миллионов человек [189]. Одним из основных загрязнителей, который оказывает влияние на здоровье населения, окружающую среду, и состояние сооружений [190-193].

В природе большое количество процессов протекают по пути нелинейных процессов, когда слабое возмущение ведет к масштабным изменениям среды обитания. Для атмосферы, свойственны процессы, идущие при сравнительно малых энергетических затратах, которые ведущие к изменениям энергетических состояний. Аэрозоль как раз является одним из таких триггеров в процессах облако и осадкообразования [35].

Как было сказано выше атмосферный аэрозоль влияет на количество приходящей прямой и рассеянной радиации на поверхность земли и оказывает косвенное воздействие на круговорот углерода. Что в свою очередь влияет на климатическую систему посредством обратных связей климат-углерод [194]. Это воздействие обусловлено изменением количества и качества коротковолновой радиации, доходящей до растительности, и соответственно изменением в процессах фотосинтеза. Атмосферный аэрозоль через поглощение и рассеяние поступающей солнечной радиации уменьшает количество принимаемой солнечной радиации верхней частью растительного полога. Единого мнения о степени влияния каждого процесса - поглощения и рассеяния радиации в настоящие времена нет. Что связано с различиями экосистем и состоянием окружающей среды в местах проведения экспериментов. Данные эффекты напрямую зависят от оптических свойств аэрозолей, количества солнечных и пасмурных дней, дней с осадками, количества аэрозолей в атмосфере [36], а также от состояния окружающей среды и типов экосистем.

С одной стороны, фотосинтез растений имеет тенденцию усиливаться с увеличением освещенности. Однако теоретические исследования и наблюдения показали, что фотосинтез также более эффективен в условиях рассеянного освещения. Изменения облачного покрова или концентрации атмосферных аэрозолей, возникающие в результате антропогенных или природных выбросов, изменяют общее количество фотосинтетически активного излучения, достигающего поверхности, и долю рассеянного излучения, что оказывает воздействие на продуктивность растений и поглощению углерода [195].

Чем выше аэрозольная оптическая толщина, тем меньше приходящая солнечная радиация на поверхность земли [196], что должно отрицательно влиять на эффективность фотосинтеза в экосистемах. С другой стороны, аэрозоли, изменяя угловое распределение света, увеличивают долю рассеянного света, который, в свою очередь, проникает глубже и более равномерно распределяется в пологе [197]. Так как освещенные светом листья насыщены светом, а затемненные нет, увеличение рассеянного света также должно вести к увеличению фотосинтеза. Исследования [198-199] показывают, что диффузное излучение увеличивает эффективность использования света экосистемами.

Исследователями проводились попытки вычислить влияние прямой и рассеянной солнечной радиации на первичную валовую продукцию. Прирост валовой первичной продукции при увеличении диффузной радиации, вызванной аэрозолями и облаками, и потери первичной продукции, происходящие из-за общего снижения радиации исследовались в работах [196, 198, 200]. Также были предприняты попытки оценить влияние аэрозолей при построении моделей атмосферы и поверхности суши при наличии и отсутствии антропогенных аэрозолей. Данные этих исследований не учитывали эффект от наличия рассеянной радиации [201].

В исследовании [195] учитывался эффект прямой и диффузной радиации на процессы фотосинтеза. По полученным оценкам, изменения доли диффузной радиации, увеличили поглощение углерода сушей примерно на четверть с 1960 по 1999 год. Однако в данном исследовании не учитывалось влияние аэрозолей на охлаждение атмосферы и нагревание поверхности земли, и влияние на количество осадков, которые также влияют на продуктивность экосистем [202].

Антропогенные выбросы аэрозолей с 1850 года в совокупности увеличили поглощение углерода на суше на 22,6 млрд. тонн. 78 процентов этого увеличения обусловлено повышением доли рассеянного излучения, вызванного аэрозолем, что намного больше, чем эффект затемнения, вызванного аэрозолем. Доминирующая роль диффузных изменений радиации, подразумевает, что будущие выбросы аэрозолей могут оказать гораздо более сильное воздействие на цикл углерода за счет изменения излучения, чем за счет изменения климата в одиночку [201].

Оценка содержания аэрозолей в разных регионах земного шара и их воздействие на баланс углерода является важной и актуальной задачей, требующей детального изучения. Антропогенный аэрозоль оказывает неодинаковое воздействие на разных широтах, изменяет климат и повышает долю рассеянного солнечного света и в целом увеличивает глобальное поглощение углерода. Воздействие аэрозолей, снижает поступление солнечной радиации, которое ведет к охлаждению климата и изменению гидрологического режима,

что ведет к изменению потоков углерода. Все эти изменения влияют на фиксацию углерода растительностью на суше, а также на концентрацию CO₂ в атмосфере и климат. До сих пор остается недостаточно ясным, в какой степени влияет изменение потоков радиации на потоки углерода и насколько они значимы по сравнению с изменениями других климатических переменных.

В северо-западном регионе среди основных источников антропогенного загрязнения атмосферы можно выделить загрязнения от автомобильного транспорта, промышленных предприятий, а также продукты сгорания органического топлива. Также свой вклад вносят естественные источники загрязнения, формирование которых не зависит от деятельности человека. Это аэрозольные частицы естественного образования [203].

Крупные города оказывают масштабное воздействие на загрязнение атмосферного воздуха вследствие выбросов сотен тонн различных загрязняющих веществ, которые влияют на самочувствие населения. Санкт-Петербург является промышленным центром Северо-Запада России с развитой транспортной инфраструктурой. Большое количество промышленных предприятий, активное использование различных видов транспорта - наземного, водного, воздушного ухудшает состояние окружающей среды, как самого города, так и прилегающих к нему областей вследствие переноса загрязняющих веществ. Санкт-Петербург демонстрирует рост промышленности, численности автомобильного транспорта [204]. Постоянная тенденция к увеличению легковых и грузовых автомобилей составляет 1.5-2.5 % в год. В 2021 году количество легковых автомобилей в городе составило 1 800 214 ед., грузовых автомобилей 236 683 ед., автобусов 20 709 ед. всего 2 057 606 единиц транспорта. Не сложно подсчитать, что на каждого трех жителей мегаполиса приходится один автомобиль. Выбросы загрязняющих веществ от автотранспорта г. Санкт-Петербурга составляют 128.9 тыс. тонн. От стационарных источников Санкт-Петербурга в атмосферу суммарно выбрасывается 72.2 тыс. тонн загрязняющих веществ. Основной объем выбросов - 64% от суммарных выбросов всех загрязняющих веществ г. Санкт-Петербурга, вносят автотранспортные средства. Основным источником загрязнения среди стационарных источников являются сектора производства, передачи и распределения электроэнергии, газа, пара и горячей воды [205]. Количество твердых загрязняющих веществ в общих выбросах составляет: от автотранспорта – 0.5 тыс. тонн, от стационарных источников - 3.3 тыс. тонн [206].

Значительное количество аэрозольных частиц образуется при истирании асфальта, покрышек, тормозных дисков и колодок, шипов автомобильных шин, частиц почвы и песчаных и соляных смесей, которыми обрабатываются дороги [207]. Вся эта смесь, на

которой адсорбируются различные загрязняющие вещества, в том числе канцерогенные поднимается в воздух [208-210].

Пылевые частицы (сажа) эффективно поглощают излучение, что приводит к снижению поступающего солнечного света к поверхности земли: при $0.1 \text{ мг}/\text{м}^3$ – до 10%, при $1 \text{ мг}/\text{м}^3$ – до 55% [207]. Антропогенный и природный аэрозоль играет важную роль в климатических процессах [211].

Методы лидарного дистанционного контроля экологической безопасности окружающей среды позволяют оценивать содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, своевременно обнаруживать негативные изменения окружающей среды и выявлять потенциально опасные явления [212-214].

В России активно работают в данном направлении, разрабатываются лидарные системы - институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, АО «Лазерные системы» Санкт-Петербург и др., проводятся исследования мирового уровня, в том числе в составе ведущих научных групп [215-222].

Лидарные технологии активно применяются по всему миру для отслеживания аэрозольных загрязнений в атмосфере, выбросов промышленных предприятий, переноса аэрозолей при песчаных бурях, горении растительности, извержении вулканов и т.д. [223-232]. Создано много крупных международных научно-исследовательских сетей, использующих лидарное оборудование. Сеть NDACC (<https://www.ndsc.ncep.noaa.gov>), объединяющая 16 лидарных станций, создана для глобального контроля озона, аэрозоля, температуры и влажности. Для мониторинга тропосферного аэрозоля под эгидой NASA развивается лидарная сеть MPL-Net [233].

В 2000 г. сформирована Европейская лидарная сеть EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network), координирующая работу более чем 20 лидарных комплексов европейских стран по мониторингу крупномасштабного переноса аэрозольных примесей, в основном из района пустыни Сахара (<https://www.earlinet.org/index.php>). В 2014 году появилась первая станция EARLINET на территории России. Оборудование размещено в Ресурсном центре (РЦ) «Обсерватория экологической безопасности» Научного парка СПбГУ на Васильевском острове в наиболее антропогенно нагруженной части г. Санкт-Петербурга. В РЦ проводятся работы по отслеживанию переноса аэрозолей в Северо-Западном регионе с 2014 года.

Лидарные исследования выноса пылевого аэрозоля с пустынной территории Китая выполняются в рамках функционирования Азиатской лидарной сети AD-Net (Asian Dust Network) [234]. Создана Восточно-Американская лидарная мезосеть REALM (Regional East Atmospheric Lidar Mesonet) [235]. Мониторинг атмосферного аэрозоля и озона в регионах

СНГ, начиная с 2006 г., регулярно осуществляется с использованием сети лидарных станций CIS-LiNet, расположенных в России, Беларуси и Киргизии [222].

Помимо сетей, в которых используются активные методы детектирования аэрозоля с использованием лазерного излучения, была создана сеть AERONET (Аэрозольная роботизированная сеть), представляющая собой сеть наземных солнечных фотометров, которые измеряют свойства атмосферного аэрозоля. Измерительная система представляет собой спектральный радиометр CIMEL Electronique 318A, который измеряет солнечное и небесное сияние на нескольких фиксированных длинах волн. AERONET обеспечивает непрерывные наблюдения аэрозольной оптической толщины (AOT). В дальнейшем данные проходят специальную обработку, где отсеиваются полученные при неблагоприятных погодных условиях. (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>)

Использование лидаров и фотометров по всему миру говорит об их эффективности для отслеживания содержания аэрозолей в атмосферной толще [236-239]. Лидар позволяет получать значения оптической толщины с разбивкой по высотам, фотометр же дает интеграл АОТ всего атмосферного столба. Аэрозольная оптическая толщина позволяет получить важную информацию о содержании аэрозоля в атмосфере [240-242].

Изменчивость содержания аэрозолей в приземном слое атмосферы в Санкт-Петербурге и Ленинградской области практически не изучена. Учитывая влияние аэрозолей на климатическую систему, углеродный баланс и здоровье населения, были выполнены следующие исследования, позволяющие оценить вклад аэрозоля

Исследование закономерностей распределения аэрозоля в Северо-Западном регионе с применением лидарных технологий, что позволило получить важную информацию о пространственном распределении аэрозольных частиц.

В Санкт-Петербурге и прилегающих территориях, происходит постоянное изменение содержания и состава аэрозольной компоненты в атмосфере, связанное с большим количеством выбросов от автомобильного транспорта, промышленных предприятий, а также продуктов сгорания органического топлива. Также свой вклад вносят аэрозольные частицы естественного образования [203].

Полученные данные о распределении аэрозолей состояния атмосферы над урбанизированными территориями Санкт-Петербурга и Ленинградской дает возможность провести оценку изменения приходящей прямой и рассеянной солнечной радиации.

7.1.1 Аэрозольные загрязнения над г. Санкт-Петербургом в разные сезоны по результатам лидарных измерений с 2014 по 2022 год

Измерения АОТ проводилось с использованием многоволнового Nd:YAG лазера, работающего на трех длинах волн, расположенным на 10 линии, В.О, дом 33/35 г. Санкт-

Петербурга на высоте 23 метра над землей. Характеристики лидарного комплекса представлены в таблице 29.

Таблица 29. Характеристики аэрозольного лидара стационарного лидарного комплекса.

Максимальная энергия импульса	
1064 нм	420 мДж
532 нм	160 мДж
355 нм	100 мДж
Длительность импульса	5-8 нс
Максимальная плотность энергии на выходной апертуре лидара	
1064 нм	43.7 мДж/кв.см
532 нм	16.6 мДж/кв.см
355 нм	10.4 мДж/кв.см
Частота следования импульсов, Гц	20
Диаметр апертуры телескопа, мм	300
Тип телескопа	Рефлектор Ньютона
Слепая зона, м	300
Фокусное расстояние, мм	1200
Относительное отверстие	1 : 3.4
Полевая диафрагма, мм	0.6
Рабочие длины волн, мкм	0.532, 1.064
Пространственное разрешение, м	7.5

Для восстановления оптических параметров атмосферы использовалось уравнение лидарного зондирования:

$$P(z) = A \frac{\beta(z)}{z^2} \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right] \quad (9)$$

где $P(z)$ – мощность детектируемого обратно рассеянного сигнала с высоты z , A – аппаратная константа, $\alpha(z')$ – коэффициент обратного рассеяния, $\beta(z)$ – коэффициент ослабления. Аэрозольная оптическая толщина в слое с высоты от z_{min} до z_{max} может быть рассчитана следующим образом:

$$AOD = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \alpha(z) dz \quad (10)$$

Расчёт оптических параметров, выполнялся по методу Клетта. При обработке данных погрешность составляет до 20 процентов в зависимости от типа и содержания аэрозоля и состояния атмосферы [75-77].

Измерения лидарным комплексом выполняются в ясную погоду, при отсутствии облаков нижнего и среднего яруса, соответственно весной и летом проводилось большее количество измерений, чем в осенне-зимний период, что связано с количеством солнечных дней, подходящих для проведения измерений. Количество измерений по годам приведено в таблице 30.

Таблица 30. Количество измерений по сезонам и годам.

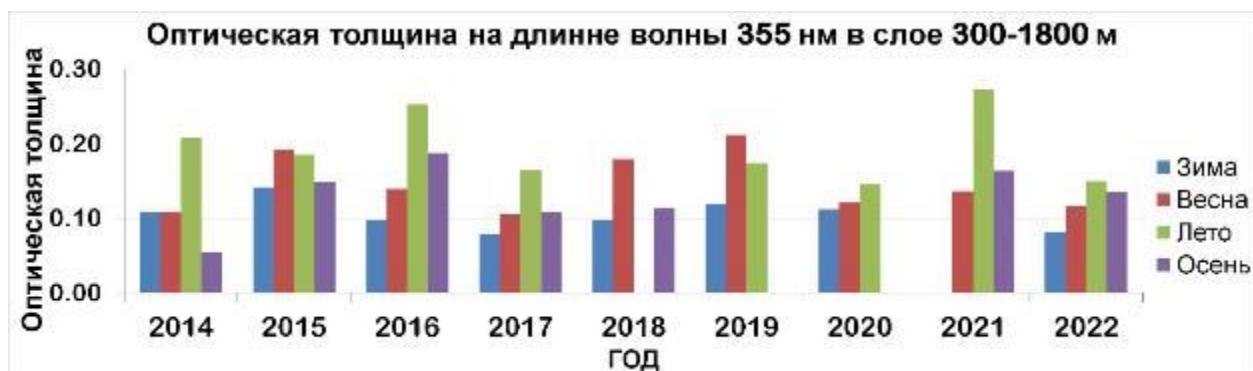
Год	Сезон				всего
	Зима	Весна	Лето	Осень	
2014	4	7	11	6	28
2015	7	13	12	4	36
2016	2	5	2	2	11
2017	6	19	22	10	57
2018	7	10	0	4	21
2019	3	1	6	0	10
2020	1	6	2	0	9
2021	0	1	1	3	5
2022	2	20	1	2	25
всего	32	82	57	31	202

В связи с Covid ограничениями, необходимостью наладки и ремонта оборудования, проведения технического обслуживания лазера, а также разным количеством дней с подходящей для измерений погодой, количество измерений в разные годы различается.

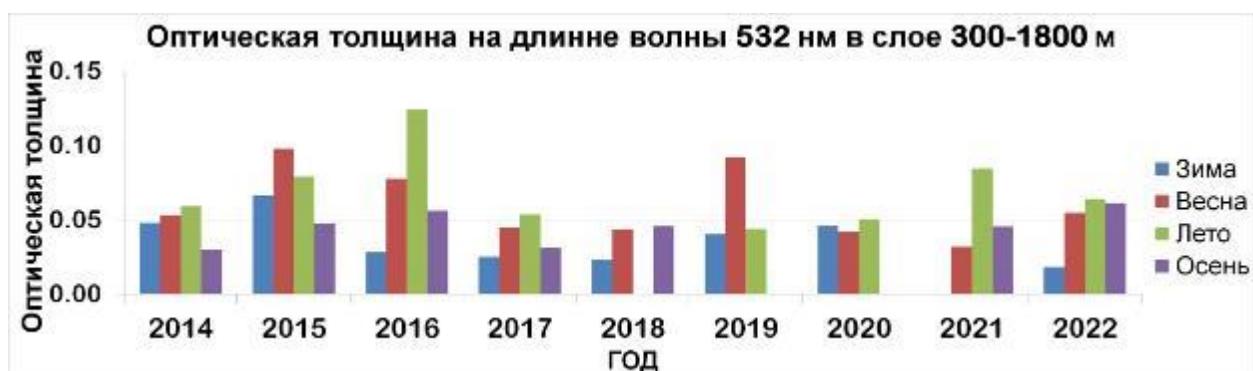
По результатам многолетнего мониторинга видно, что АОТ выше в весенне-летние дни. Повышенный уровень АОТ в 2021 и 2016 гг. связан с наличием единичных измерений, проведённых в летний сезон стационарным лидарным комплексом. Поэтому максимальные сезонные значения АОТ на длине волны 355 нм зарегистрированные летом 2016 г. – 0,25 и 2021г. – 0.27 и на длине волны 532 нм АОТ летом 2016 г. – 0.12 и 2021 г. – 0.08 были бы, скорее всего, сглажены при проведении большего количества измерений (Рисунок 42).

Минимальные значения АОТ 355 нм отмечаются осенью 2014 г. – 0.05 и зимой 2017 и 2022 гг. – 0.08, минимальные значения АОТ 532 нм отмечаются зимой 2017 г. – 0.025, 2018 г. – 0.023, 2022 г. – 0.018. Значения на длине волны 355нм приблизительно в 2-2.5 раза выше, чем на длине волны 532 нм, что говорит о преобладании мелкодисперсного аэрозоля над г. Санкт-Петербургом. Повышение содержания аэрозолей над городом при повышении

температуры воздуха, связано с вертикальным перемещением воздуха, обусловленным разностью температур. В целом в значениях распределения аэрозолей в разные сезоны с 2014 по 2022 год наблюдается повышенные значения АОТ в летние и весенние месяцы и пониженное значение в зимнее время. В большинстве случаев значения АОТ за весь период наблюдений остаются на одном и том же уровне.



А



Б

Рисунок 42 – Сезонное распределение оптической толщины по годам с 2014 по 2022 гг., для 355 нм канала (А) и для 532 нм канала (Б).

В связи с недостаточным количеством данных для оценки изменчивости распределения аэrozолей по сезонам в разные годы, был выполнен расчет среднего значения АОТ для каждого сезона за все годы наблюдений для двух каналов: 355 и 532 нм, результаты представлены на Рисунке 43.

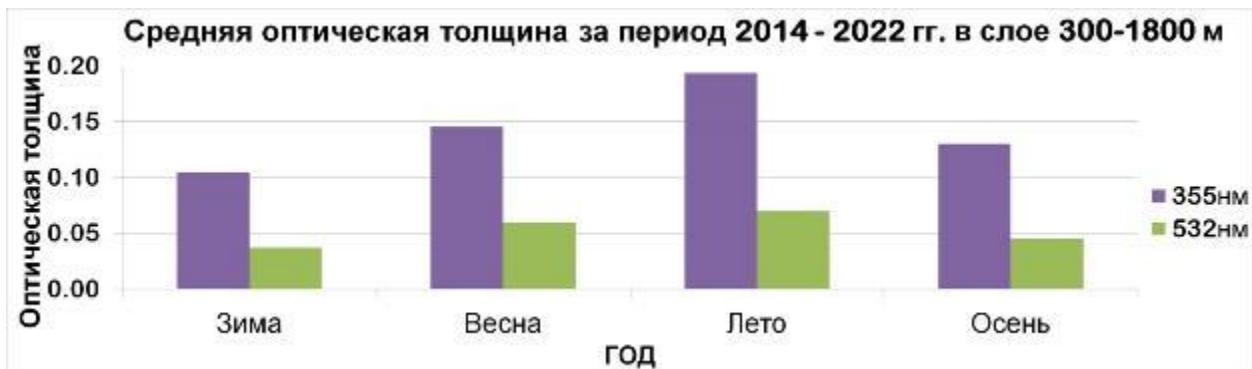


Рисунок 43 – Средняя оптическая толщина за период 2014-2022 гг.

Как видно на рисунке 43 летом АОТ имеет максимальные значения, приблизительно в два раза большие, чем в зимний период, как на длине волны 355нм, так и 532 нм. АОТ 355нм летом составляет 0.194, 0.145 весной, 0.13 осенью, 0.104 зимой. На длине волны 532 нм АОТ летом составляет 0.07, 0.06 весной, 0.045 осенью и зимой 0.037. Минимальные значения АОТ зарегистрированы зимой на длине волны 355 нм – 0.104, на длине волны 532 нм – 0.037. В процентном отношении Значения АОТ 355 нм летом, на 87% выше, чем зимой, на 49% выше, чем осенью, и на 33% выше, чем весной. Значения АОТ 532 летом на 89% выше, чем зимой, на 54% выше, чем осенью, и на 17 % выше, чем весной. Значения АОТ полученные весной превышают АОТ полученные осенью на длине волны 355 нм на 12%, на 32% на длине волны 532 нм.

Максимальные значения АОТ отмечаются летом, на длине волны 355 нм АОТ составляет 0.194, на длине волны 532 нм – 0.070, минимальные значения АОТ зарегистрированы зимой на длине волны 355 нм – 0.104, на длине волны 532 нм – 0.037.

Повышение уровня аэрозолей в теплые дни связано с прогреванием пограничного слоя атмосферы и подъемом воздуха с содержащимися аэрозольными загрязнениями вместе с конвективными потоками. В зимние месяцы содержание аэрозолей в приземном слое атмосферы минимально, что связано, в том числе, с его аккумуляцией снежным покровом. С потеплением, высыханием поверхности, большое количество аэрозоля поднимается в атмосферу. Именно в эти месяцы оказывается максимальное воздействие на здоровье населения, и происходит перенос аэрозолей в близлежащие области.

Содержание аэрозолей снижено осенью по сравнению с весенним сезоном, что, по всей видимости, связано с выдуванием большей части накопленных за зиму аэрозольных частиц, а также с преобладающим количеством дней с осадками в осенний период, которые вносят свой вклад естественное самоочищение атмосферы.

В связи с тем, что измерение АОТ выполнено с высоты 300 метров, возможно, что часть аэрозолей образовалась за чертой города и была перенесена в Санкт-Петербург вместе

с ветровыми потоками с прилегающих к городу территорий. Для более точной оценки образующихся в черте города аэрозольных загрязнений, планируется проведение одновременных измерений аэрозоля на границе СПб и Ленинградской области, над городом и на выходе с территории г. Санкт-Петербурга с учетом ветровой обстановки.

7.1.2 Аэрозольное загрязнение атмосферы по данным лидарного комплекса и солнечного фотометра

В работе сравнивались данные полученные с применением аэрозольного Nd:YAG лидара и солнечного фотометра CIMEL CE 318 полученные в светлое время суток при отсутствии облачности в атмосфере.

Расположение стационарного лидарного комплекса, его характеристики и методы расчета представлены в начале раздела.

Солнечный фотометр CIMEL CE 318, установлен в Петергофе (59,88 с.ш., 29,83 в.д.) в РЦ «Геомодель», высота площадки 58 м над уровнем моря. Фотометр CIMEL позволяет получить оптическую толщину атмосферного столба на следующих длинах волн 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940, 1020 и 1640 нм [243]. Фотометр всегда направлен на солнце с помощью встроенного солнечного трекера. Расчетная неопределенность в вычисленной АОТ, в первую очередь из-за неопределенности калибровки, составляет 0,010–0,021. Авторами использовались данные второго уровня AERONET (версия обработки 3,0), данная версия позволяет исключать мешающие факторы, такие как облака, температурные аномалии, смог, слабую спектральную зависимость.

Расстояние между лидарным комплексом и фотометром CIMEL составляет 25,8 км.

Проведено сравнение 56 измерений лидара и фотометра для канала 532 нм, и 52 измерения для канала 355 нм с 2014 по 2021 год (Рисунок 44) выполненных в один и тоже день. За 2022 год данные спектрофотометра отсутствуют. Для проведения к соответствию каналов лидара и фотометра был произведен пересчет данных. АОТ 355 нм для солнечного фотометра была получена из АОТ 380 и 340 нм, 532 нм полученного из АОТ 500 и 675 нм путем использования уравнения (11) и уравнения (12) [240, 244].

$$a_{i-k} = - \left[\frac{\ln \left(\frac{AOD_i}{AOD_k} \right)}{\ln \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_k} \right)} \right] \quad (11)$$

$$AOD_j = AOD_i \times \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-a_{i-k}} \quad (12)$$

где AOD – аэрозольная оптическая толщина, α - коэффициент Ангстрема, λ_j – длина волны, находящаяся между длинами волн λ_i и λ_k .



Рисунок 44 – Количество одновременных измерений лидаром и фотометром по годам

Стоит отметить, что расстояние в почти 26 км, дополнительное включение аэрозолей от источников расположенных между площадками наблюдений, наличие Финского залива, отличие нижних слоев атмосферы города и пригорода влияет на количество перемещаемого аэрозоля, и, соответственно на АОТ.

Оптическая толщина вычисляется исходя из спектрального ослабления луча на каждой длине волны при помощи закона Бугера. Релеевское рассеяние при расчёте АОТ полученной лидарным комплексом програмно отбрасывается, что позволяет рассчитывать именно оптическую толщину аэрозоля.

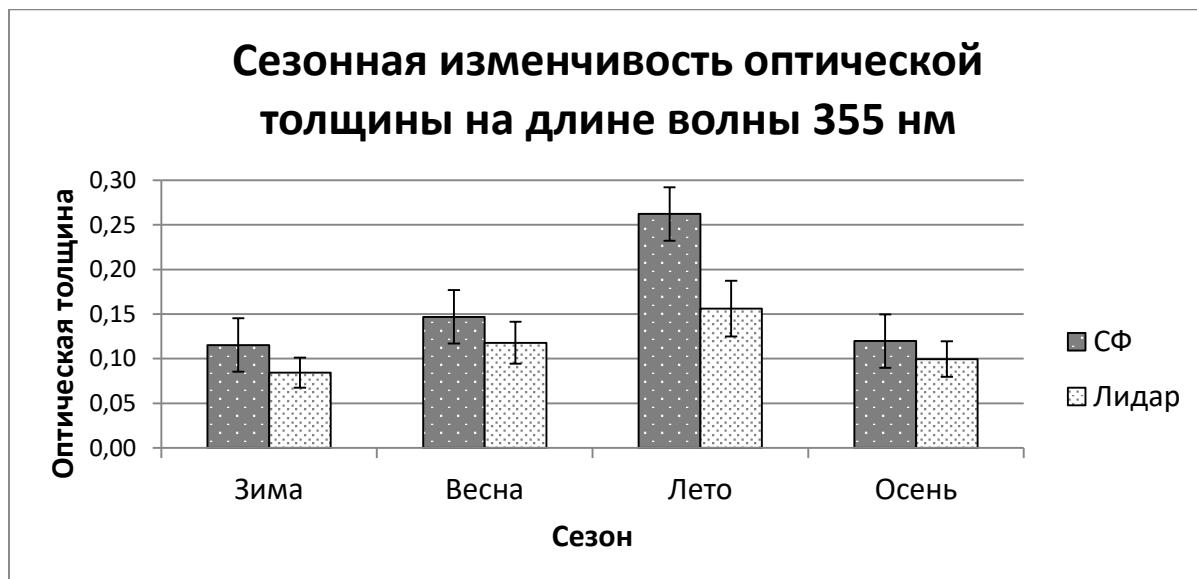
Алгоритм инверсии аэрозолей AERONET версии 3 включает в себя подробную характеристику поглощения газа, которая не учитывалась во второй и предыдущих версиях. В дополнение к поглощению озона (O_3) третья версия также учитывает поглощение диоксида азота (NO_2) и водяного пара (H_2O), чтобы указать общее поглощение газа в атмосферном столбе [245].

АОТ обоих приборов выше в весенние и летние дни, что говорит о более высоких концентрациях аэрозолей в весенне-летний период и объясняется прогреванием планетарного пограничного слоя, и последующим увеличением распространения аэрозолей в весенне-летний период, ростом количества поднимаемого в воздух аэрозоля на автомобильных трассах и улицах городов, а именно реагентов, продуктов истирания автомобильных покрышек и асфальта, грязи занесенной на проезжую часть вместе с конвективными потоками. Летом отмечается меньшее количество дней с суммарным значением выпавших осадков 1 мм или более (<http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=2>). Большое количество дней с дождливой,

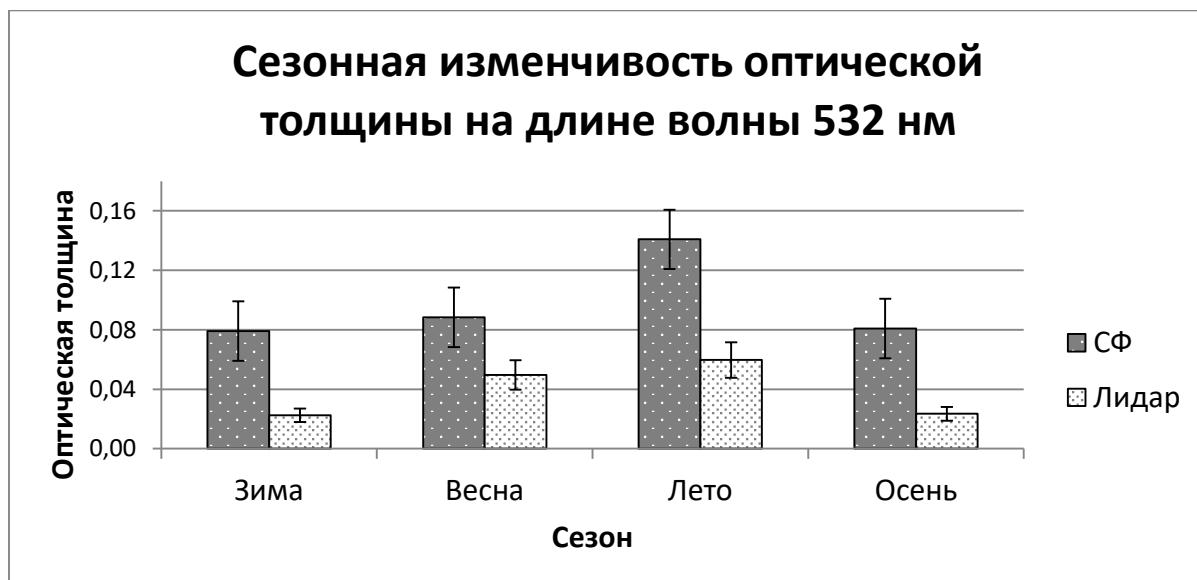
пасмурной погодой и высокой влажностью способствует повышенному самоочищению атмосферы от аэрозольных загрязнений.

При анализе данных АОТ фотометра и лидара видны одни и те же тренды, данные хорошо согласуются при распределении аэрозолей в разные сезоны. АОТ получаемая фотометром в большинстве случаев выше, за счет наличия слепой зоны у лидара до 300 м, а также из-за различий в верхней границе измерений у приборов.

АОТ обоих приборов выше в весенние и летние дни (Рисунок 45), на длине волны 355 нм составляют для спектрофотометра и лидара: весной – 0,15 и 0,12, летом – 0,26 и 0,16, осенью – 0,12 и 0,10, зимой – 0,12 и 0,08, соответственно. На длине волны 532 нм весной – 0,09 и 0,05, летом – 0,14 и 0,06, осенью – 0,08 и 0,02, зимой – 0,08 и 0,02.



A



B

Рисунок 45 – Сезонная динамика среднего значения оптической толщины в совпадшие дни измерений в УФ (А) и в видимом спектре (В) с погрешностями

Зависимость данных стационарного лидарного комплекса от данных солнечного фотометра можно представить как $l=a\cdot p+b$, при этом $0 < a < 1$, и $b > 0$. Показания фотометра и лидара удовлетворительно линейно связаны (Рисунок 46). Так, значения в видимом диапазоне могут быть описаны уравнением $l = 0,31 \cdot p + 0,01$ ($r=0,48$), где l — значения, полученные на лидаре, p — показания фотометра, r — коэффициент корреляции. Для УФ-значений применимо уравнение $l = 0,31 \cdot p + 0,067$ ($r=0,56$).

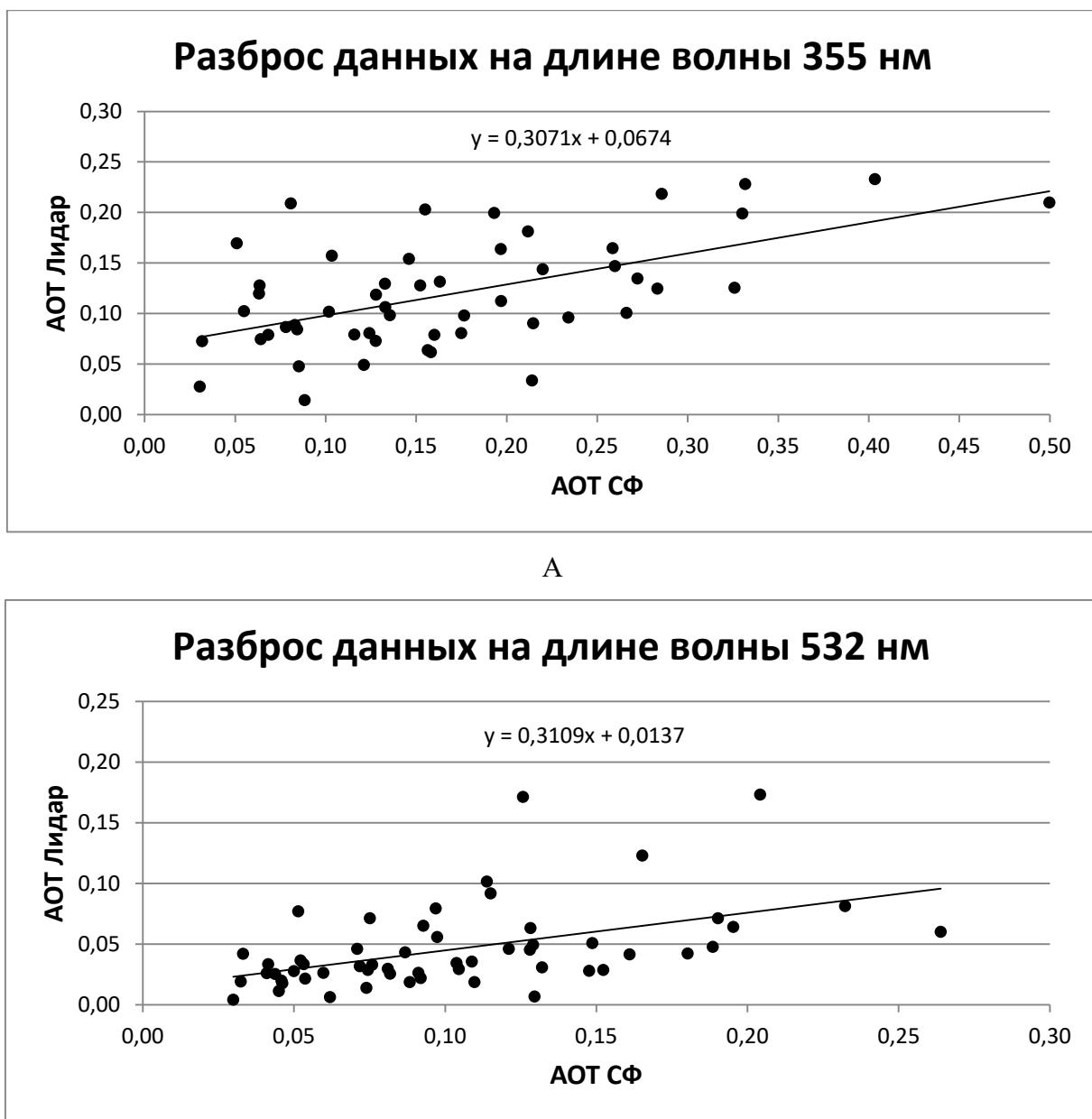


Рисунок 46 – Разброс данных лидара и солнечного фотометра на длинах волн 355 нм (А) и 532 нм (Б).

Проведено сравнение измерений, полученных с помощью солнечного фотометра и лидарного комплекса, находящихся на расстоянии 25,8 км. АОТ обоих приборов выше в весенние и летние дни, на длине волны 355 нм составляют для спектрофотометра и лидара: весной – 0,15 и 0,12, летом – 0,26 и 0,16, осенью – 0,12 и 0,10, зимой – 0,12 и 0,08, соответственно. На длине волны 532 нм весной – 0,09 и 0,05, летом – 0,14 и 0,06, осенью – 0,08 и 0,02, зимой – 0,08 и 0,02. Повышенное содержание аэрозолей весной и летом объясняется подъемом аэрозольных частиц вместе с конвекционными потоками при прогревании планетарного пограничного слоя. В некоторых случаях отмечается превышение АОТ полученное лидарным комплексом над АОТ фотометра, даже несмотря на наличие слепой зоны лидара. По всей видимости, это связано с дополнительным поступлением в атмосферу аэрозольных частиц, от антропогенных источников, расположенных на территории г. Санкт-Петербурга. Что еще раз подчеркивает необходимость и важность мониторинговых наблюдений аэрозольных загрязнений именно в городской черте.

Сравниваемые данные оптической толщины лидара и фотометра, расположенные на расстоянии 25,8 км имеют удовлетворительную согласованность. Интересной представляется задача проведение измерений мобильным лидарным комплексом в непосредственной близости от станции AERONET для улучшения постановки обратной задачи при восстановлении параметров аэрозоля и получения более детальную информацию о загрязнении атмосферы аэрозольными частицами.

7.1.3 Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербурге

Мобильный и стационарный лидарные комплексы (Рисунок 47) позволяют проводить натурные измерения аэрозолей и ветровых характеристик. В комплексах имеются аэрозольный и ветровой лидары.



А



В

Рисунок 47 – Лидарные комплексы: А) мобильный лидарный комплекс В) стационарный лидарный комплекс на 10 линии Васильевского острова

Подробно характеристики мобильного и стационарного лидарных комплексов приведены в статье [246]. Способ расчета коэффициентов ослабления и обратного рассеяния аэрозоля по данным лидарного зондирования представлен в работе [220].

На Рисунке 48 приведен коэффициент ослабления, полученный на площадке наблюдений в Выборгском районе 17 октября 2020 г с 10.45 до 13.48, и в г. Санкт-Петербурге, где измерения проводились 10 октября 2020 г. с 11.00 до 14.30. 10 и 17 октября 2020 года регистрировалось западное направление ветра.

Восстановленные профили микрофизических параметров аэрозолей численная, поверхностная и объемная концентрации частиц, действительная и мнимая часть коэффициента преломления представлены на Рисунке 49.

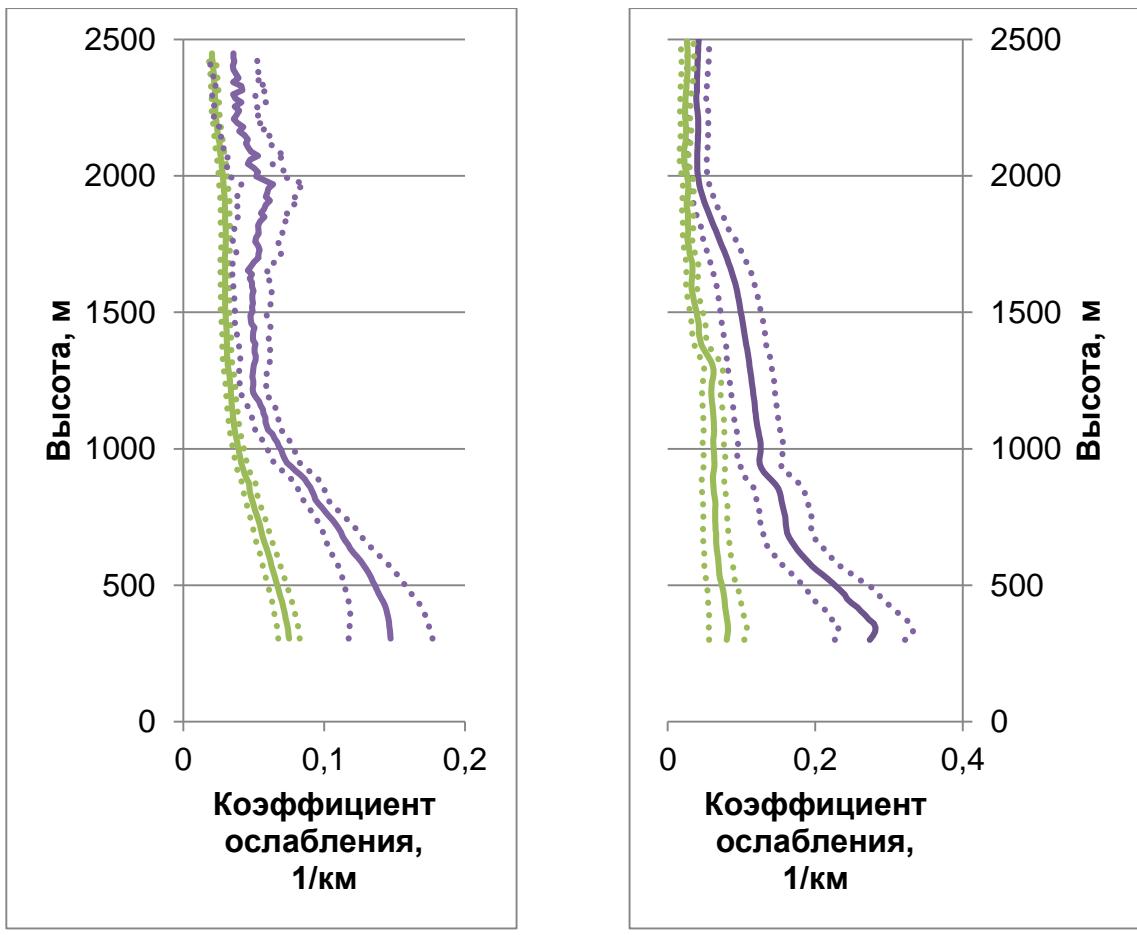
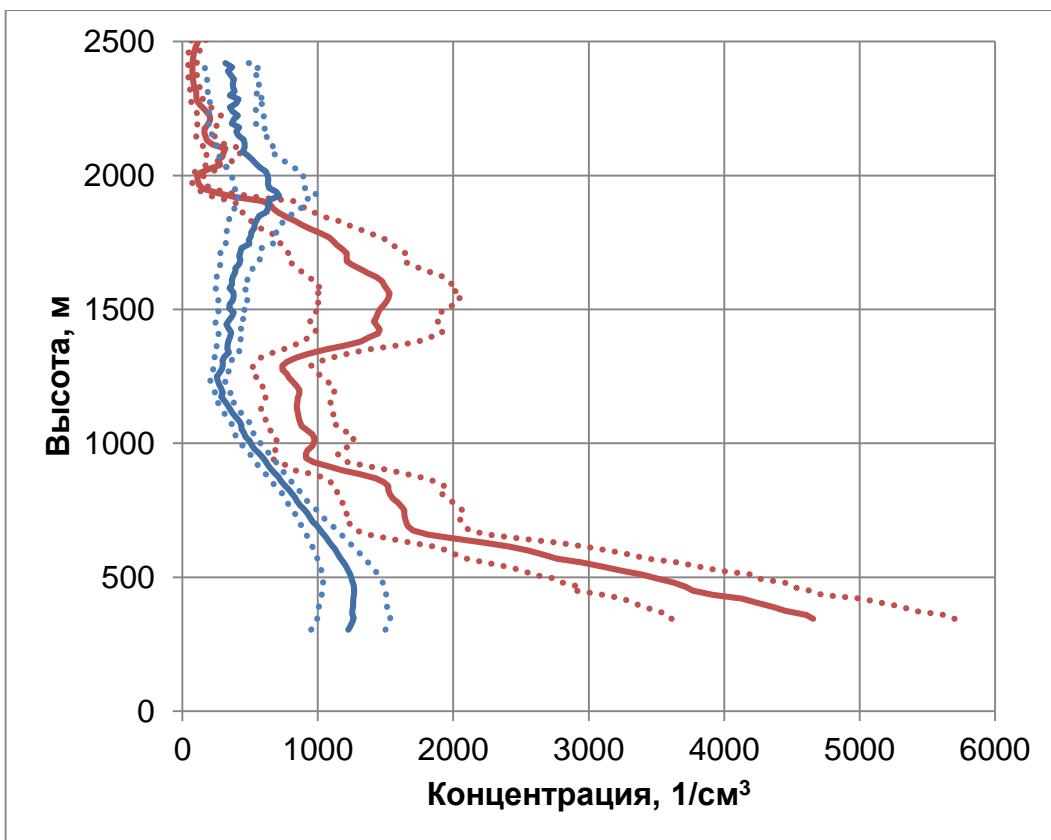
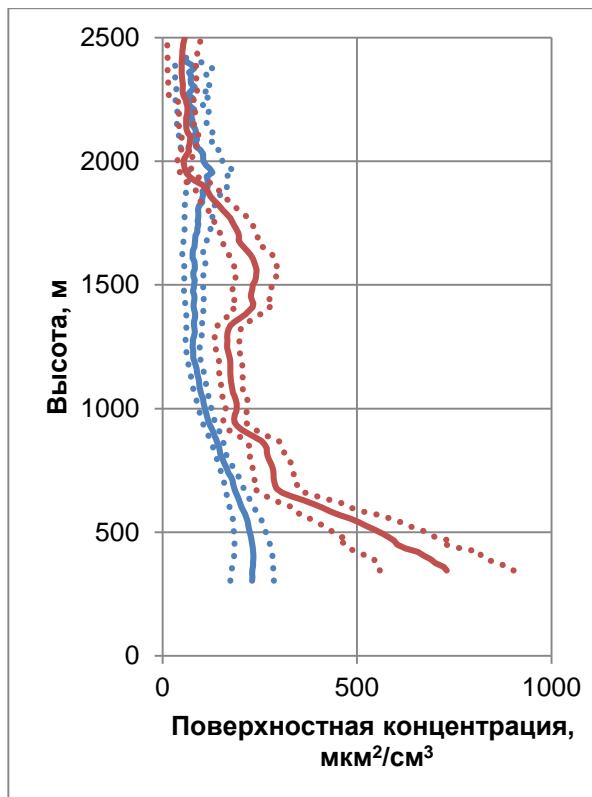


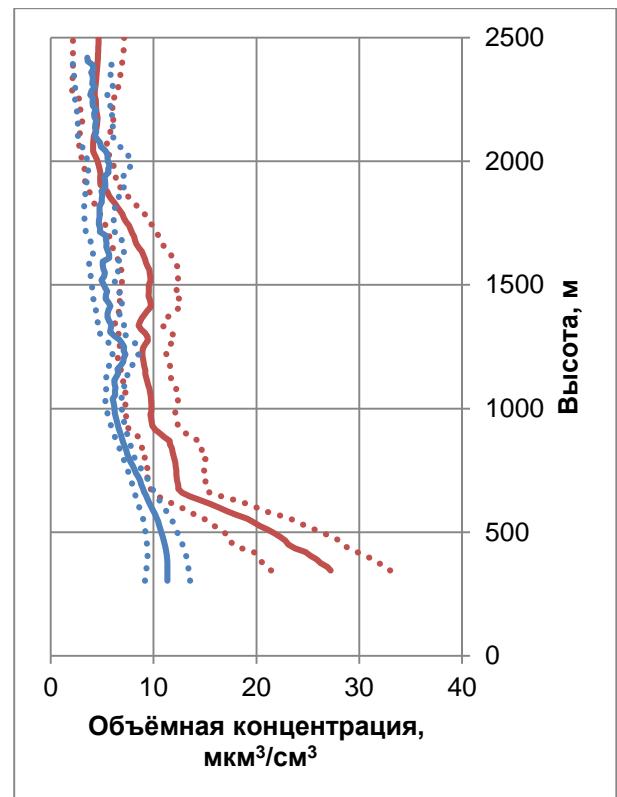
Рисунок 48 – Профили коэффициента ослабления на длинах волн 355 и 532 нм: А) в Выборгском районе; В) в Санкт-Петербурге



A



B



C

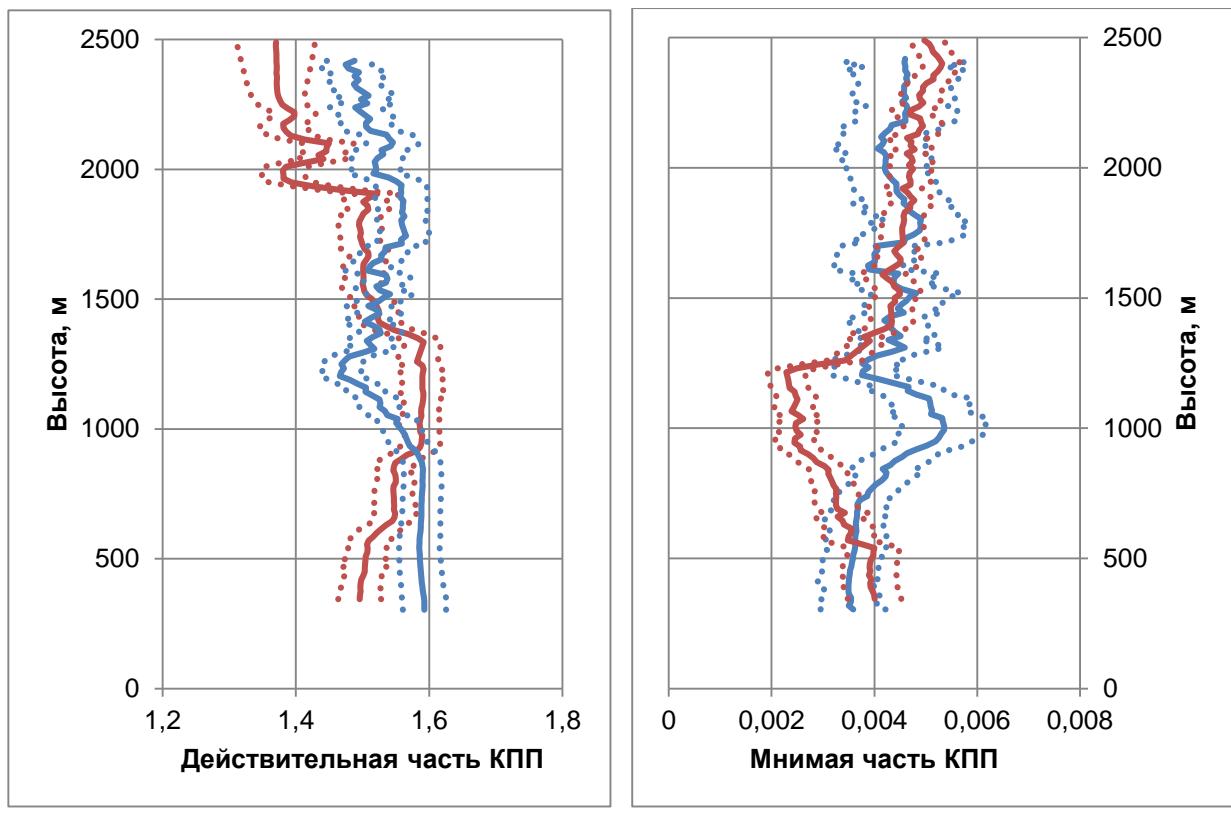


Рисунок 49 – Профили микрофизических параметров в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (красная линия): А) численная концентрация; В) поверхностная концентрация; С) объёмная концентрация; Д) действительная часть КПП; Е) мнимая часть КПП.

Коэффициент ослабления в Выборгском районе не превышал значений $0,15 \pm 0,03$ км^{-1} на длине волны 355 нм и $0,075 \pm 0,008$ км^{-1} на длине волны 532 нм. Повышенные значения коэффициента ослабления позволяют определить высоту нахождения насыщенного аэрозолем слоя. Максимальные значения отмечаются от нижней границы наблюдений на высоте 300 м до высоты 1200 м. Выше концентрация аэрозолей снижается. В тоже время в Санкт-Петербурге значения не превышали $0,28 \pm 0,05$ км^{-1} на длине волны 355 нм и $0,08 \pm 0,02$ км^{-1} на длине волны 532 нм. Максимальные значения коэффициента ослабления в Санкт-Петербурге зарегистрированы на высотах от 350 м до 2000 м.

Максимальное значение численной концентрации аэрозолей в Выборгском районе наблюдалось на нижней границе наблюдений 300 м около 1260 ± 274 частиц в см^3 . На высотах от 1200 до 2400 м можно отметить наличие аэрозольного слоя с максимальной численной концентрацией на высоте 1900 м равной 713 ± 283 частиц в см^3 , вызванное изменением направления ветра на данных высотах. Аэрозольная оптическая толщина для слоя от 300 до 2500 м составила 0,15 и 0,08 для длин волн 355 и 532 нм соответственно. В

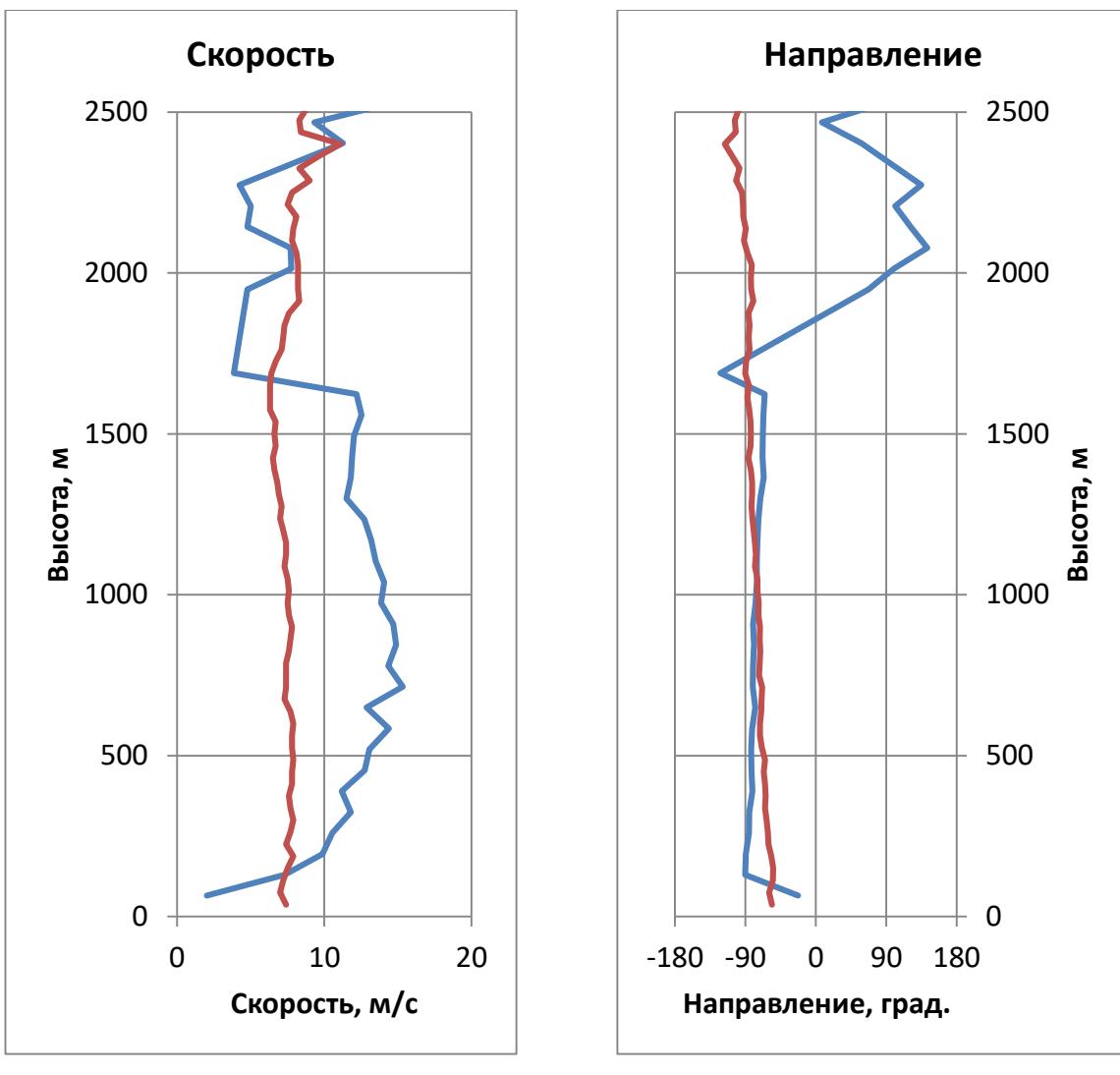
Санкт-Петербурге максимальная концентрация составила 4657 ± 1045 частиц в см^3 на высоте 350 м, в слое 1300-1900 м со значением 1530 ± 529 на высоте 1560 м. Оптическая толщина в Санкт-Петербурге в слое от 300 до 2500 м составила 0,25 и 0,1 на длинах волн 355 и 532 нм соответственно.

Параметр Ангстрема позволяет сделать вывод о характере распределения частиц по размерам. Значение выше 2 указывает на преобладание мелкодисперсного аэрозоля, тогда как значение ниже 1 говорит о преобладании крупных аэрозольных частиц. В день проведения наблюдений в Выборгском районе параметр Ангстрема в среднем в столбе на всей высоте измерений соответствовал значению $1,44 \pm 0,24$. Это свидетельствует о смешанном распределении аэрозоля с наличием как мелко, так и крупно дисперсной фракции с долей мелкодисперсного аэрозоля от 30 до 70 процентов. Параметр Ангстрема в день наблюдения в Санкт-Петербурге составил $1,91 \pm 0,56$ и обусловлен преобладанием мелкодисперсного аэрозоля над мегаполисом.

Параметр Ангстрема (440-870 нм) в Петергофе с 2013—2016 гг. по данным AERONET [243], изменяется по месяцам от 1,0 до 1,6 с максимальными значениями в теплое время года. Осенью в некоторые дни наблюдений он достигает 1,9. Принимая во внимание расстояние между местами наблюдений, возможен дополнительный вклад вторичного мелкодисперсного аэрозоля антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге, что дает более высокие значения параметра Ангстрема.

Действительная и мнимая часть КПП в Выборгском районе находились в пределах 1,47-1,59 и 0,0035-0,0053, в Санкт-Петербурге в пределах 1,37-1,59 и 0,0023-0,0052. Имеющиеся показатели говорят о присутствии в атмосфере СПб и Выборгского района индустриального и морского аэрозоля.

Динамика воздушной массы представлена в виде вертикальных профилей скорости и направления ветра на Рисунок 50.



A

B

Рисунок 50 – Профили ветровых характеристик в Выборгском районе (синяя линия) и в Санкт-Петербурге (Красная линия): А) скорость; В) направление (± 180 – южное, -90 – западное, 0 – северное, 90 – восточное)

Направление ветра в дни наблюдений в Санкт-Петербурге и Выборгском районе Ленинградской области было западным (со стороны Финляндии). В Выборгском районе скорость ветра на всех высотах наблюдений не превышала 16 м/с. Во время проведения измерений в Санкт-Петербурге скорость ветра составляла 7-8 м/с.

Пространственное распределение аэрозолей в СПб и Ленинградской области было исследовано на основании полученных оптических данных с применением многоволновых лидарных систем. Проведенные измерения позволили проследить различия содержания аэрозольной компоненты в Санкт-Петербурге и Выборгском районе Ленинградской области, оценить вклад вторичного аэрозоля в загрязнение атмосферы в мегаполисе. Показано, что численная концентрация частиц по лидарным данным на высоте 350 м в

Санкт-Петербурге более чем в 3,5 раза превышает численную концентрацию частиц в Выборгском районе, что, по мнению авторов, связано с вкладом вторичного аэрозоля антропогенного происхождения. Меньшее содержание аэрозольных частиц в Выборгском районе, как и следовало ожидать, вызвано отсутствием крупных промышленных предприятий вблизи площадки наблюдения, а также западным направлением переноса (со стороны Финляндии вдоль побережья Финского залива), зарегистрированным в дни наблюдений, который препятствовал заносу аэрозолей из г. Санкт-Петербурга. Зарегистрированное направление ветра позволило оценить вклад мегаполиса в загрязнение атмосферы.

Высота насыщенного аэрозолем слоя в Санкт-Петербурге ограничена высотой 2000 м, в Выборгском районе 1200 м. Концентрация аэрозолей, зарегистрированная в Выборгском районе, на всей высоте лидарного зондирования до 2000 м значительно ниже, чем в Санкт-Петербурге. Содержание аэрозолей выше 2000 м не имеет значительных различий между Санкт-Петербургом и Выборгским районом. В атмосфере г. Санкт-Петербурга аэрозольная компонента представлена более мелкодисперсной фракцией аэrozоля, чем в Выборгском районе. Данный тип аэrozоля представляет большую опасность для здоровья населения, по сравнению с крупнодисперсной фракцией.

Повышенное содержание аэrozолей над мегаполисом ведет к дополнительной нагрузке на прилегающие к Санкт-Петербургу районы, которая в значительной степени определяется метеорологической обстановкой. Также повышенное содержание аэrozолей ведет к уменьшению прозрачности атмосферы, и приводит к пространственной неоднородности поступления УФ радиации в СПб и Ленинградской области. Ввиду изменчивости пространственного распределения аэrozолей в пограничном слое атмосферы, необходимо проведение непрерывного мониторинга состояния атмосферы с применением лидарных технологий.

7.1.4 Аэrozольное загрязнение атмосферы на примере данных лидарного зондирования в Санкт-Петербурге (Россия), Куопио (Финляндия), Минске (Беларусь)

Результаты лидарного зондирования аэrozольного загрязнения в Санкт-Петербурге (Россия) сравнивались с данными, расположенными в Минске (Беларусь) и Куопио (Финляндия) для оценки влияния крупных городов на загрязнение атмосферы аэrozольными частицами. Станции были выбраны исходя из их местоположения. Минск и Куопио являются ближайшими к Санкт-Петербургу пунктами наблюдения за аэrozолями и имеют разный уровень антропогенной нагрузки. Наше исследование даст больше информации о закономерностях распространения аэrozолей в изучаемых регионах.

Минск и Санкт-Петербург имеют самую разветвленную сеть промышленных предприятий, а также большое население. В Санкт-Петербурге проживает около 5,4 миллиона человек, в Минске – 2 миллиона человек. Основу промышленности Санкт-Петербурга составляют более 750 крупных и средних предприятий, некоторые из которых входят в число ведущих производственных предприятий России. Хозяйственную деятельность в сфере промышленного производства также осуществляют более 23 тысяч малых предприятий, в том числе микропредприятия. В Минске действует более 3100 промышленных предприятий, а в Минской области – более 2700, что также оказывает серьезное воздействие на окружающую среду. Куопио – восьмой по величине город Финляндии, который расположен в районе Саво рядом с многочисленными озерами. Численность жителей составляет около 120 тысяч человек. Город включен в сравнение как пример относительно экологически безопасной территории.

Для сравнения использовались данные аэрозольной оптической толщины (АОТ), полученные на трех станциях с 2014 по 2021 год. Лидарное зондирование атмосферных аэрозолей проводилось с помощью аэрозольных Nd:YAG-лазеров, работающих на трех длинах волн: 355, 532 и 1064 нм. Из-за различий в характеристиках оборудования лидарных станций и, как следствие, нижнего предела определения аэрозолей, оптическая толща аэрозоля сравнивалась в диапазоне высот от 800 до 1600 м на длинах волн 355 и 532 нм. Поскольку сравниваемые станции не имеют данных за все годы, период с 2014 по 2016 гг. анализировался отдельно. Среднегодовой АОТ 355 в Минске в период 2014-2016 годов практически равен среднегодовому АОТ в Санкт-Петербурге. При сравнении данных по Санкт-Петербургу и Минску за период 2014-2020 годов АОТ 355 в Санкт-Петербурге превышает АОТ 355 в Минске в 1,46 раза. АОТ 532 нм в Минске больше, чем в Санкт-Петербурге, независимо от выбранного периода сравнения. Среднегодовые АОТ 355 в Куопио ниже, чем в Минске и Санкт-Петербурге в 2,1 раза, а на длине волны 532 нм в 3,6 раза ниже, чем в Минске и в 2,6 раза в Санкт-Петербурге. Рассчитанный коэффициент степени Ангстрема показывает, что грубая мода в Минске выше, чем в Санкт-Петербурге. Атмосфера над Куопио имеет меньшее содержание аэрозольных частиц. С 2017 года над Санкт-Петербургом наблюдалось устойчивое превышение содержания аэрозолей над Минском. Дополнительно было проведено сравнение лидарных данных с суммарной АОД станций AERONET, расположенных в Куопио, Минске и Петергофе (25 км от лидарной станции в Санкт-Петербурге). АОТ, полученная с помощью лидара и метода AERONET, хорошо согласуется.

Основные технические характеристики лидарных систем представлены в Таблице 31.

Таблица 31. Характеристики лидарных станций в России, Финляндии и Беларуси

Характеристика	Санкт-Петербург, Россия	Куоппио, Финляндия	Минск, Беларусь
Географические координаты	59,9427 N, 30,2730 E	62,7333 N, 27,5500 E	53,9170 N, 27,6050 E
Высота над уровнем моря, м	35	190	200
Используемые длины волн, нм	355, 532	355, 532	355, 532
Пространственное разрешение, м	7,5	30; 60	7,5; 15
Минимальная высота детектирования, м	300-500	800-1000	455-800

Лидарное оборудование используется совместно со специализированным программным обеспечением, позволяющим обрабатывать сигнал обратного рассеяния, принимаемый телескопом. Величина сигнала зависит от количества аэрозоля, присутствующего в атмосфере. Коэффициенты ослабления и обратного рассеяния аэрозоля, полученные по данным лидарного зондирования, рассчитывались с использованием метода Клетта [247].

Большой массив данных, полученных в ходе измерений в наиболее загрязненной части Санкт-Петербурга, а также Минске и Куопио, позволяет проанализировать изменение АОТ во времени, а также выявить закономерности в распределении аэрозолей за период с 2014 по 2021 год. Вариативность аэрозольного загрязнения над такими крупными мегаполисами, как Санкт-Петербург и Минск, и сравнение данных с относительно экологически благополучным районом Куопио позволяет оценить степень загрязнения городов.

Ограничение высоты определения оптической толщины аэрозоля обусловлено различиями в нижнем пределе измерений приборами [248-249]. В Куопио данные в большинстве случаев предоставляются с высоты 800 м, поэтому нижней границей наблюдений на всех трех станциях является высота 800 м. Верхний уровень наблюдений ограничен 1600 м. Это связано с тем, что часть имеющихся данных заканчивается на высоте 1600 м.

Для получения усредненного значения АОТ было обработано следующее количество измерений (Таблица 32):

Таблица 32. Количество измерений по годам

Город	Канал, нм	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Всего
Санкт-Петербург	355	40	40	18	50	21	9	9	5	192
	532	40	45	18	50	21	9	9	5	197
Минск	355	3	29	26	16	15	12	7	-	108
	532	7	29	28	17	16	13	8	-	118
Куоппио	355	7	22	20	-	-	-	-	-	49
	532	12	42	30	-	-	-	-	-	84

Расстояние между станциями наблюдения составляет: между Санкт-Петербургом и Куоппио 343 км, между Куоппио и Минском 980 км и 689 км между Санкт-Петербургом и Минском.

Из-за ограничений, связанных с коронавирусом, количество измерений, проведенных в 2019-2021 годах, значительно сократилось.

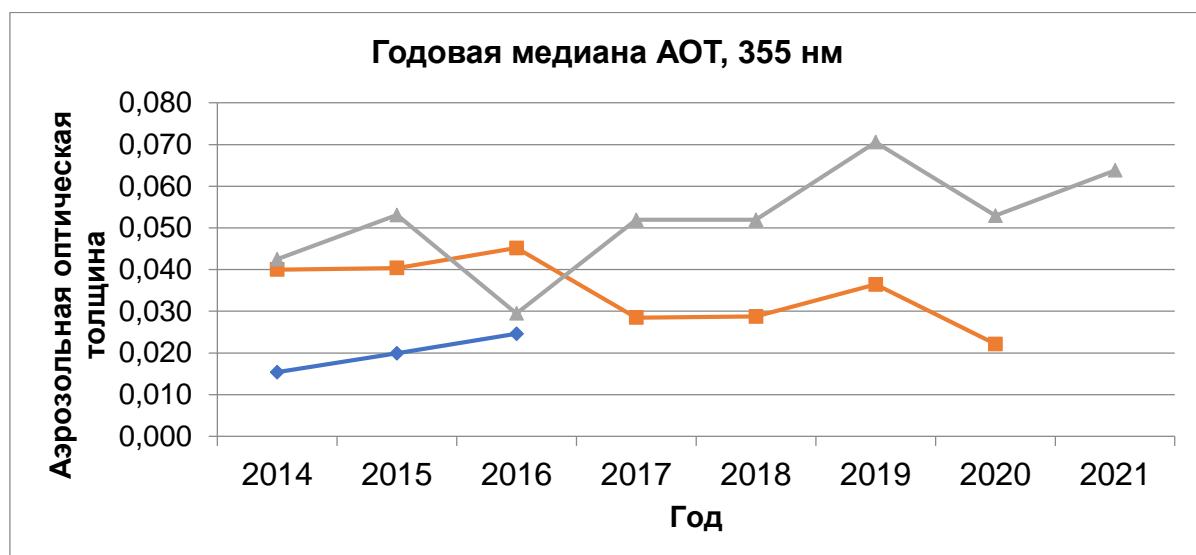
В таблице 33 и на рисунке 51 показаны медианные значения АОД 355 и АОД 532, полученные на трех станциях мониторинга в Санкт-Петербурге, Минске и Куоппио в период с 2014 по 2021 год на высотах от 800 до 1600 м. Медиана является устойчивой оценкой распределительного центра и не имеет тенденции к смещению при значительных отклонениях от основного массива данных. К сожалению, из-за сложности исследовательского оборудования, требующего периодического обслуживания и ремонта, данные для сравнения в Куоппио и Минске получены не по каждому году.

Таблица 33. Распределение медианного значения оптической толщины по годам за период 2014-2021 гг. для трех станций в слое от 800 до 1600 м.

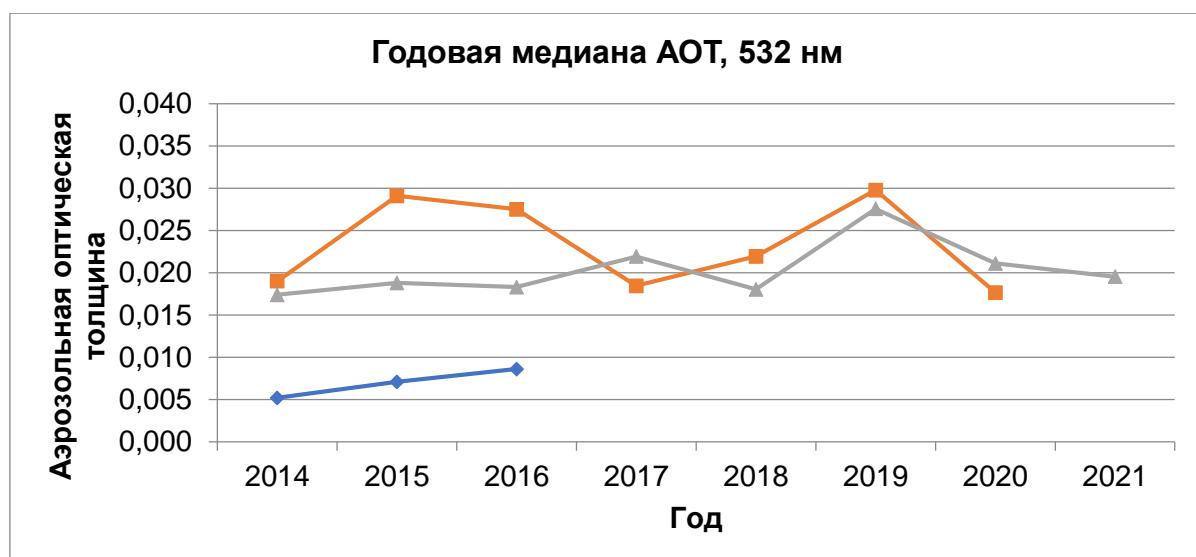
Год	Санкт-Петербург, Россия		Минск, Беларусь		Куоппио, Финляндия	
	355 nm	532 nm	355 nm	532 nm	355 nm	532 nm
2014	0.043	0.017	0.040	0.019	0.015	0.005
2015	0.053	0.019	0.040	0.029	0.020	0.007
2016	0.030	0.018	0.045	0.028	0.025	0.009

2017	0.052	0.022	0.028	0.018	-	-
2018	0.052	0.018	0.029	0.022	-	-
2019	0.071	0.028	0.036	0.030	-	-
2020	0.053	0.021	0.022	0.018	0.013*	0.010*
2021	0.064	0.020	-	-	0.048*	-
Среднее	0.052	0.020	0.034	0.023	0.020	0.007

* – данные только с 1000 м.



A



B

Рисунок 51 – Распределение медианного значения оптической толщины по годам в период с 2014 по 2021 год для трех станций в слое от 800 до 1600 м на длинах волн 355 нм (А) и 532 нм (В). (синий – Куопио, красный – Минск, зеленый – Санкт-Петербург)

К сожалению, данные на высоте 800 м на станции в Куопио доступны только за три года с 2014 по 2016 гг. Согласно обработанным данным АОТ на длине волны 355 нм (Рисунок 51А), атмосфера в месте расположения станции в Куопио имеет меньшее содержание аэрозольных частиц, АОТ на длине волны 355 нм в Санкт-Петербурге выше, чем в Минске, за исключением 2016 года. С 2017 года наблюдается устойчивое превышение содержания аэрозоля над Санкт-Петербургом по сравнению с Минском, при этом максимальное превышение в 2,4 раза в 2020 г. (Рисунок 51А).

Также учитывался параметр Ангстрема на длинах волн 355 и 532 нм отдельно за период 2014-2016 гг. для всех трех станций и с 2014 г. по 2020 г. для лидарных станций в Санкт-Петербурге и Минске. Параметр Ангстрема позволяет сделать вывод о характере распределения частиц по размерам. Параметр Ангстрема выше 2 указывает на преобладание мелкодисперсного аэрозоля, тогда как значения ниже 1 указывают на преобладание крупных аэрозольных частиц. В период с 2014 по 2016 год значение параметра Ангстрема составляло 2,60 в Куопио, 1,26 в Минске и 2,05 в Санкт-Петербурге. В период с 2014 по 2020 год средний параметр Ангстрема имеет значения 0,92 в Минске и 2,18 в Санкт-Петербурге. Это указывает на преобладание мелкодисперсного аэрозоля над Санкт-Петербургом.

В качестве дополнительного источника информации о годовом ходе АОТ под Санкт-Петербургом мы использовали данные станции AERONET в Петергофе, расположенной в 25 км от лидарной станции, а также данные станций AERONET в Куопио и Минске [243,250]. В среднем за период измерений с 2013 по 2016 гг. АОТ в Петергофе на длине волны 500 нм составляет $0,12 \pm 0,05$ с максимальными значениями летом 0,14–0,19. Для станции AERONET в Куопио среднее значение АОТ на длине волны 500 нм составляет $0,10 \pm 0,03$. Авторы данного исследования также отмечают, что значения АОТ в Петергофе выше результатов наблюдений в Куопио, что связано с вкладом антропогенного аэрозоля, что характерно для крупных мегаполисов. Полученные в работе [243] закономерности распределения АОТ хорошо согласуются с данными, полученными лидарным методом для станций Куопио и Санкт-Петербурга. Параметр Ангстрема (440–870 нм) в Петергофе по данным AERONET изменяется от 1,0 до 1,6 с максимальными значениями в теплое время года. Это свидетельствует о смешанном бимодальном распределении аэрозоля с мелкодисперсной фракцией до 60%. Учитывая расстояние между пунктами наблюдения, возможен дополнительный вклад вторичного мелкодисперсного аэрозоля антропогенного происхождения в Санкт-Петербурге, что дает более высокие значения параметра Ангстрема. На станции AERONET в Куопио наблюдается аналогичная зависимость. Высокие летние значения параметра Ангстрема в Петергофе авторы [243] связывают с

увеличением количества мелкодисперсного вторичного аэрозоля. Завышение ангстремного параметра в Санкт-Петербурге и Куопио, полученное по лидарным данным по отношению к ангстремному параметру AERONET, по-видимому, связано с ограничением высоты наблюдения от 800 до 1600 м, расположением лидарной станции в центре Петербурга тоже влияет.

В Минске параметр Ангстрема (440-870 нм), рассчитанный по данным станции AERONET с 2002 по 2019 годы [250], существенно меняется в течение года, при этом среднегодовые значения параметра Ангстрема по данным AERONET превышают 1,3, что также указывает на преобладание мелкодисперсных аэрозолей и не совсем согласуется с результатами, полученными лидарным методом. Среднесуточные значения АОТ 440 нм и показателя Ангстрема (440-870 нм) станции AERONET в Минске варьируются от 0,03 до 2,08 и от 0,11 до 2,35, а среднемесячные значения - от 0,14 до 0,27 и от 1,19 до 1,58 соответственно. Полученное среднегодовое значение АОТ 440 составляет $0,22 \pm 0,17$. Средний параметр Ангстрема (355–532 нм) в Минске по данным лидара составляет 0,92, что значительно ниже коэффициента в Санкт-Петербурге и Куопио и не совсем характерно для Минска. Полученное расхождение можно объяснить небольшим количеством лидарных наблюдений в Минске в период с 2018 по 2020 год. Измерения в этот период проводились в основном ранней весной и зимой, а параметр Ангстрема (355-532 нм) показывает заниженные значения – 0,54, что, несомненно, влияет на итоговое значение АОТ и параметра Ангстрема за весь период с 2014-2020 гг. При этом средний параметр Ангстрема (355–532 нм) за период с 2014 по 2017 год составляет 1,23, что близко к показаниям станции AERONET в Минске. Можно отметить, что как АОТ 355, так и АОТ 532 в Санкт-Петербурге и Минске в среднем превышают значения АОТ в городе Куопио в 2-3 раза. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что атмосфера в городе Куопио меньше загрязнена аэрозольными частицами, что, по мнению авторов данной статьи, обусловлено небольшим количеством промышленных предприятий, расположенных в этом регионе, а также низкой Интенсивность автомобильного движения. При этом следует отметить, что природный аэрозоль также может вносить свой вклад в общее содержание аэрозольных загрязнений городов [251]. Повышенное содержание аэрозолей над Санкт-Петербургом и Минском может привести к дополнительному негативному воздействию на здоровье населения за счет процессов аэрозольного выпадения.

Поскольку сравниваемые станции не имеют данных за все годы, сравнение проводилось по следующей методике. Отдельно анализировался период с 2014 по 2016 гг., поскольку за эти три года все три станции имеют измерения (Рисунок 52А). Отдельное

сравнение было проведено для Минска и Санкт-Петербурга с 2014 по 2020 год (Рисунок 52В). На Рисунке 52 отчетливо видно преобладание средней АОТ Минска и Санкт-Петербурга на длинах волн 355 нм и 532 нм над Куопио. Средняя АОТ 355 в Санкт-Петербурге и Минске превышает АОТ 355 в Куопио в 2,1 раза. Средний АОТ 532 в Минске превышает АОТ 532 в Куопио в 3,6 раза, в Санкт-Петербурге АОТ 532 выше в Куопио в 2,6 раза.

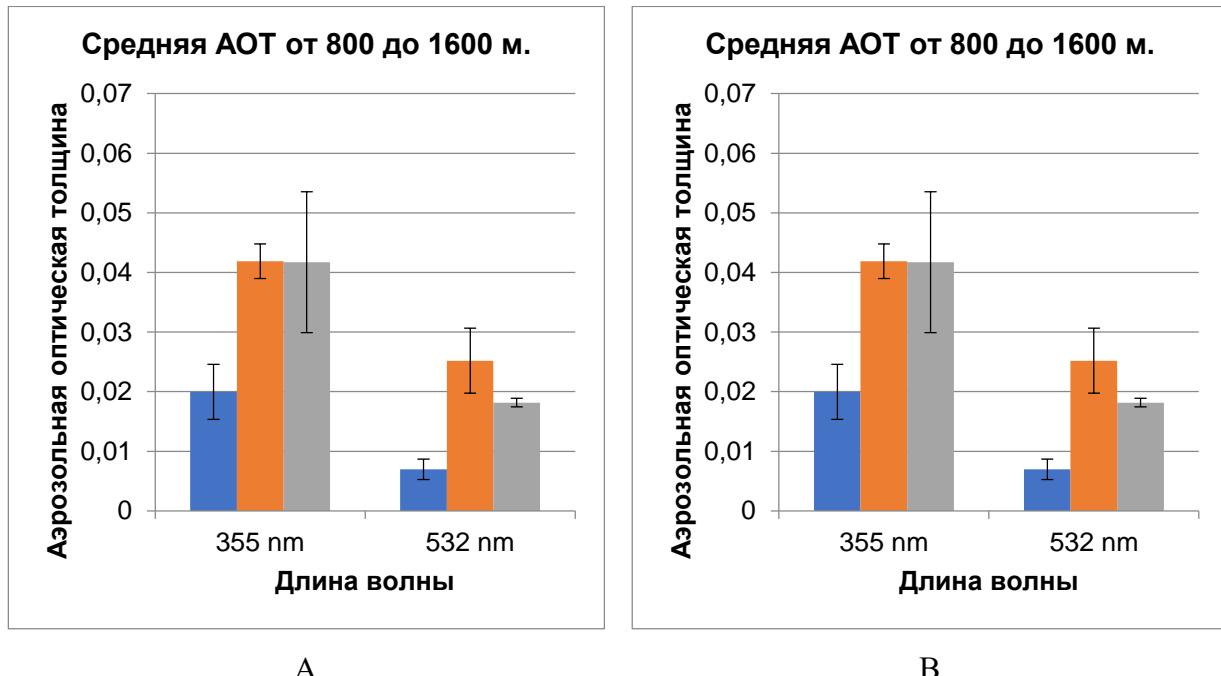


Рисунок 52 – Средние значения АОТ с 2014 по 2016 год (А) и с 2014 по 2020 год (В) на длинах волн 355 нм и 532 нм (черные линии — стандартные отклонения).

Имеющиеся данные АОТ по трем станциям в Санкт-Петербурге, Минске и Куопио, расположенным в трех регионах с разным уровнем антропогенного воздействия и естественным содержанием аэрозолей, позволили оценить оптические характеристики аэрозоля и сравнить уровень загрязнения атмосферного воздуха. В Санкт-Петербурге расположение лидарной станции находится в центре города, в самом загрязненном районе.

Средний показатель АОТ 355 в Санкт-Петербурге и Минске за период 2014–2016 годов превышает это значение в Куопио в 2,1 раза. Среднее значение АОТ 532 в Минске и Санкт-Петербурге в 3,6 и 2,6 раза выше, чем в Куопио соответственно. За период 2014–2020 годов АОТ 355 имеет следующие средние значения: $0,050 \pm 0,012$ в Санкт-Петербурге и $0,034 \pm 0,008$ в Минске, а средние значения АОТ 532 составляют: $0,020 \pm 0,004$ в Санкт-Петербурге и $0,023 \pm 0,005$ в Минске. Средние значения АОТ 355 и АОТ 532 в Санкт-Петербурге в 1,46 раза выше и в 1,14 раза ниже, чем в Минске соответственно.

Дополнительно было проведено сравнение с данными станций AERONET в Петергофе, Минске, Куопио с анализом оптических характеристик, параметра Ангстрема и оценкой их вариаций. Наименьшая АОТ по данным AERONET зафиксирована в Куопио, наибольшая — в Минске, что согласуется с полученными лидарными данными. Станция в Петергофе расположена далеко от Санкт-Петербурга, что влияет на показания АОД в сторону понижения. АОД 355 по данным лидара с 2014 по 2020 год в Санкт-Петербурге постепенно увеличивается, в Минске наблюдается снижение.

Распределения параметра Ангстрема по лидарным данным в Санкт-Петербурге и Куопио хорошо согласуются с параметром Ангстрема, полученным по данным AERONET. При этом более высокие значения параметра Ангстрема отмечаются в Санкт-Петербурге и Куопио, что можно объяснить ограниченностью высоты исследования АОТ от 800 до 1600 м.

В Минске по данным AERONET параметр Ангстрема 440-870 нм с 2002 по 2019 годы превышает 1,3, что указывает на преобладание мелкодисперсных аэрозолей и не совсем согласуется с данными, полученными в результате лидарных измерений, если взять период с 2014 по 2020 год. На средний параметр Ангстрема влияют данные с 2018 по 2020 год, когда имеется небольшое количество измерений, которые проводились только ранней весной и зимой, и параметр Ангстрема 532-355 нм был существенно занижен - 0,54, что указывает на преобладание крупнозернистого аэрозоля. Рассчитанный параметр Ангстрема 532-355 нм за период с 2014 по 2017 год составляет 1,23, что уже близко и согласуется с данными, полученными в сети AERONET.

Значения АОТ 355 и 532 в городе Куопио существенно ниже, чем в Санкт-Петербурге и Минске, из-за меньшего количества аэрозольных частиц в атмосфере. Отметим, что оба значения АОТ в Санкт-Петербурге и Минске превышают значения АОТ в Куопио в 2-3 раза (Рисунок 52В), что позволяет сделать вывод о преимущественном содержании аэрозольных частиц над мегаполисами по сравнению с более мелкими городами. В данной работе АОТ сравнивалось в слое от 800 до 1600 м. Если бы можно было сравнить АОД на меньших высотах, то, возможно, различия между Санкт-Петербургом, Минском и Куопио были бы еще больше. Основной вклад в загрязнение воздуха в крупных городах, скорее всего, вносят автомобильный транспорт и промышленные предприятия с некоторым воздействием природных аэрозолей.

7.1.5 Вертикальная изменчивость аэрозольных загрязнений в Санкт-Петербурге по данным многолетних лидарных наблюдений

Измерения вертикальной изменчивости аэрозолей проводились с применением многоволнового Nd:YAG лазера, расположенным в г. Санкт-Петербург, 10 линия В.О., дом

33/35 на высоте 23 метра над землей. Измерения проводились в ясную погоду, при отсутствии облаков нижнего и среднего ярусов. Характеристики лидарного комплекса, методы расчёта представлены в [253]. Расчёт оптических параметров, выполнялся по методу Клетта. При обработке данных погрешность составляет до 20 процентов в зависимости от типа и содержания аэрозоля и состояния атмосферы [220,247,252,253].

Полученные оптические данные обрабатывались имеющимся программным обеспечением DataProcessing, разработанным для СПбГУ компанией «ООО Оптосистемы». Программа позволяет обрабатывать лидарные данные, получаемые в текстовом или бинарном виде. С помощью программного обеспечения вычитается шумовые составляющие сигнала, молекулярное рассеяние, находится точка привязки, вычисляются оптические параметры аэрозоля.

Способ расчета коэффициентов ослабления и обратного рассеяния аэрозоля по данным лидарного зондирования представлен в работе [220].

Количество измерений по месяцам и годам приведено в таблице 34.

Таблица 34. Количество измерений по месяцам и годам

Год	Номер месяца												Всего
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2014	2	2	6	1	0	0	6	5	0	4	2	2	30
2015	2	3	6	4	3	7	2	3	3	0	1	0	33
2016	2	0	3	2	0	1	1	0	0	1	1	1	13
2017	1	4	6	7	6	9	5	8	3	4	3	0	56
2018	3	4	9	1	0	0	0	0	1	2	1	0	21
2019	0	3	0	1	0	0	2	4	0	0	0	0	10
2020	0	1	6	0	0	0	0	2	0	0	0	0	9
2021	0	0	1	0	0	0	0	1	1	2	0	0	5
2022	2	0	9	8	3	1	0	0	1	1	0	0	26
2023	0	4	3	8	0	6	0	2	1	1	0	0	25
Всего	12	20	49	32	12	24	17	25	10	16	8	3	227

Судя по вертикальной изменчивости профиля коэффициентов ослабления (Рисунок 53), верхняя граница аэрозольной шапки над городом простирается от нескольких сотен метров до 1800 м. При этом наибольшая высота наблюдается в теплое время года, что можно объяснить выносом частиц, накопленных в снежном покрове, наличием вертикального потока воздуха из-за прогрева поверхности земли, а также увеличенным количеством инверсий, которые запирают вертикальную конвекцию, что также приводит к повышению концентраций аэрозоля [254].

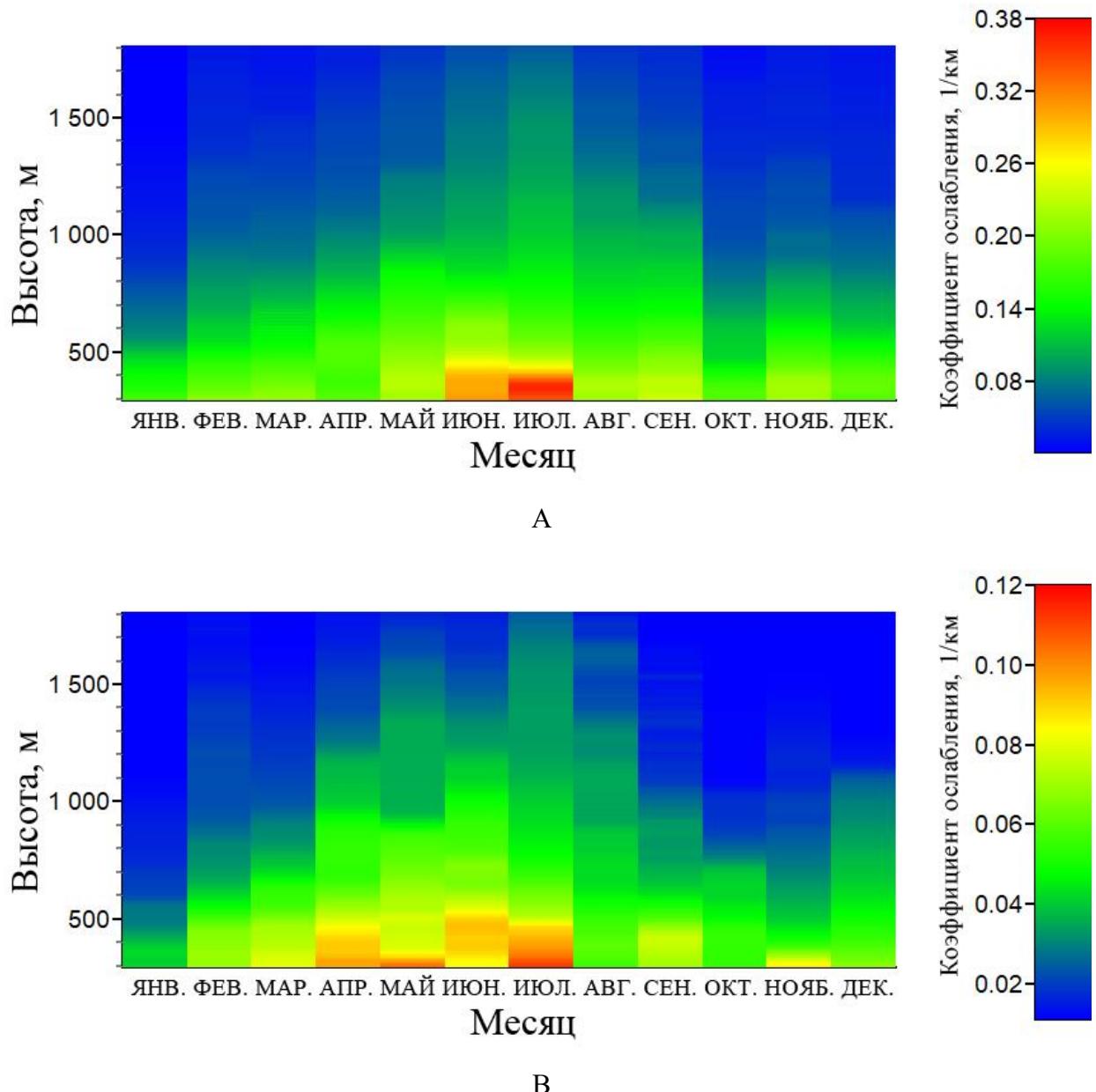


Рисунок 53 – Вертикальный профиль коэффициента ослабления для 355 нм канала (А) и для 532 нм (В) по месяцам за период с 2014 по 2023 гг

Наибольшее рассеяние излучения происходит в теплое время года (Рисунок 54), что связано с повышенной концентрацией аэрозольных частиц. Для оценки дисперсности аэрозоля проведен расчёт параметра Ангстрема. Значения параметра ниже 1 свидетельствует о преобладании крупнодисперсного аэрозоля, выше 2 о преобладании мелкодисперсных аэрозольных частиц. Ниже всего параметр Ангстрема весной, выше всего осенью, параметр изменяется в пределах от 1,95 до 2,91. В атмосфере г. Санкт-Петербурга в среднем преобладает мелкодисперсный аэрозоль. Стоит учесть, что размер и тип частиц

аэрозоля сильно зависит от направления ветра. В Санкт-Петербурге наивысшие численные концентрации аэрозолей в атмосфере отмечались при юго-восточном переносе [255].

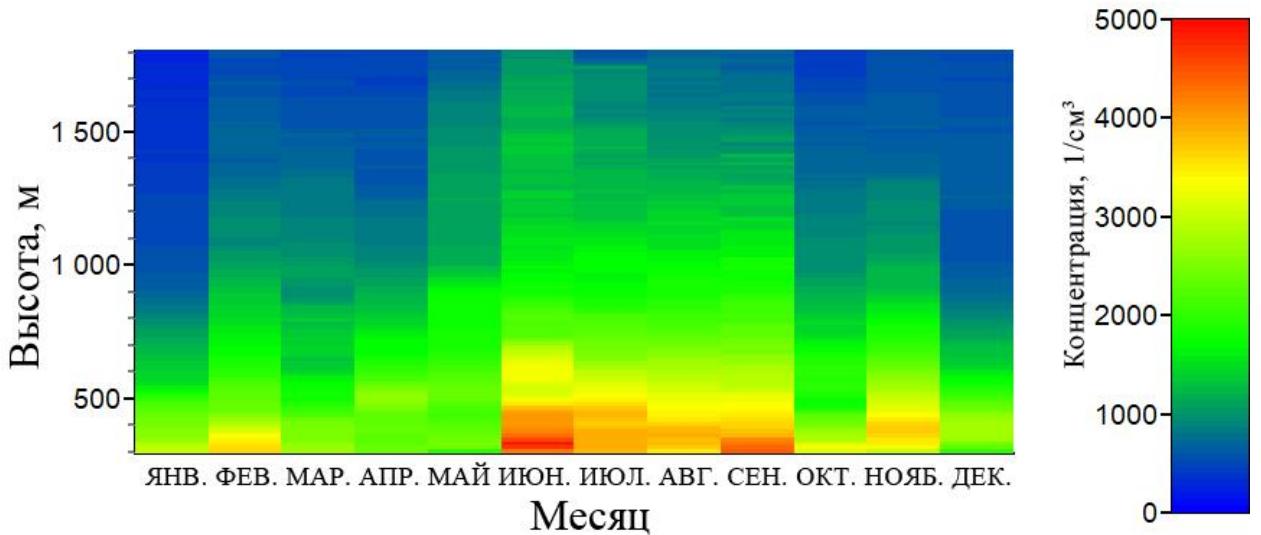


Рисунок 54 – Вертикальный профиль численной концентрации по месяцам за период с 2014 по 2023 гг

Моделирование численной концентрации аэрозольных частиц демонстрирует, превышение уровня аэрозолей в теплое время года. С апреля по май идет постепенное увеличение как плотности аэрозольной шапки, так и ее высоты. С июня по сентябрь данные выходят на некое плато. Концентрация аэрозолей постепенно падет в среднем на $220 \text{ } 1/\text{см}^3$ за каждые 100 метров в период с июня по сентябрь, и на $140 \text{ } 1/\text{см}^3$ в остальное время кроме ноября.

В июне отмечается максимальное содержание аэрозольных частиц на высотах от 300 до 1800 метров, концентрация аэрозолей находится в диапазоне от $4970 \text{ } 1/\text{см}^3$ на высоте 330 м до $970 \text{ } 1/\text{см}^3$ на верхней границе наблюдения. С июля по сентябрь вертикальный профиль концентраций аэрозолей находятся в пределах от 550 до $4500 \text{ } 1/\text{см}^3$, что существенно выше, чем в холодный сезон. Концентрации изменились в диапазонах от $3980 \text{ } 1/\text{см}^3$ до 550 $1/\text{см}^3$ в июле, от $3930 \text{ } 1/\text{см}^3$ до $730 \text{ } 1/\text{см}^3$ в августе и от 4500 до $670 \text{ } 1/\text{см}^3$ в сентябре.

Отмечается повышение концентрации аэрозольных частиц в ноябре месяце, до $3540-3740 \text{ } 1/\text{см}^3$ в слое 340-420 м. В январе-декабре наблюдается наиболее чистая атмосфера с наличием аэрозоля в нижней части исследуемого диапазона с концентрацией $3020 \text{ } 1/\text{см}^3$. В феврале отмечается повышение концентрации аэрозольных частиц до $3620 \text{ } 1/\text{см}^3$. В декабре в связи с отсутствием подходящий для измерений погоды в период с 2014 по 2023 гг. проведено всего 3 измерения. Разница в содержании аэрозолей между декабрем и январем скорее всего связана с малым количеством наблюдений, выполненных в декабре.

Санкт-Петербург вследствие сильной урбанизации (индустриализации) находится под повышенным антропогенным воздействием. В настоящем исследовании мы проанализировали сезонную и месячную изменчивость вертикального распределения и пространственной изменчивости аэрозолей в рамках долгосрочных лидарных исследований, длительностью в течение 10 лет в атмосфере над г. Санкт-Петербургом с использованием лидарных технологий. Такой информации над таким крупным мегаполисом как г. Санкт-Петербург в настоящий момент нет. Вертикальное распределение аэрозолей имеет решающее значение для определения их роли в климатических процессах и предоставления важной информации об их источниках образования и связанных с ними процессах переноса.

Максимальная плотность аэрозолей отмечается с июня по сентябрь, на высотах от 300 до 1800 м и составляет $3930\text{--}4970 \text{ 1}/\text{см}^3$, минимальные значения наблюдались в зимние месяцы, когда содержание аэрозолей на нижней границе наблюдений не превышало $3\text{--}3,5 \text{ 1}/\text{см}^3$.

В месяцы, когда в г. Санкт-Петербурге и сопредельных регионах держится снежный покров, задерживающий аэрозольные частицы, отмечается наименьшая плотность и высота аэрозольной шапки.

Максимальная высота нахождения аэрозольных слоев отмечается в период схода снега прогрева земли, когда высвобождается большое количество аэрозольных частиц, накопленных за зимний период и сдерживаемых снеговым покровом. Максимальные высоты и плотность аэрозоля прослеживаются в течении последнего месяца весны – мая, лета, захватывая сентябрь. В эти месяцы отмечается также максимумы протяженности вертикального распределения аэрозоля и коэффициентов ослабления и обратного рассеяния [253].

Параметр Ангстрема говорит о преобладании мелкодисперсного аэрозоля в атмосфере над г. Санкт-Петербургом в течение всего года.

Также стоит отметить, что лето характеризуется максимальным количеством конвективных явлений, что видно по лидарным профилям. Анализ и обработка данных позволили оценить вертикальную динамику аэрозолей по месяцам за длительный период времени с 2014 по 2023 гг. Понимание динамики и вертикальной структуры распределения атмосферных аэрозолей, полученных в настоящем исследовании, может помочь в разработке мер по смягчению последствий загрязнения аэрозольными частицами и снижению антропогенного воздействия в Северо-Западном регионе.

7.1.6 Оценка аэрозольных загрязнений в Санкт-Петербурге и п. Воейково по результатам синхронных лидарных измерений

Мобильный и стационарный лидарные комплексы (Рисунок 55) позволяют проводить натурные измерения аэрозолей. Для исследований используется Nd:YAG лазер и доплеровский гетеродинный лидар.

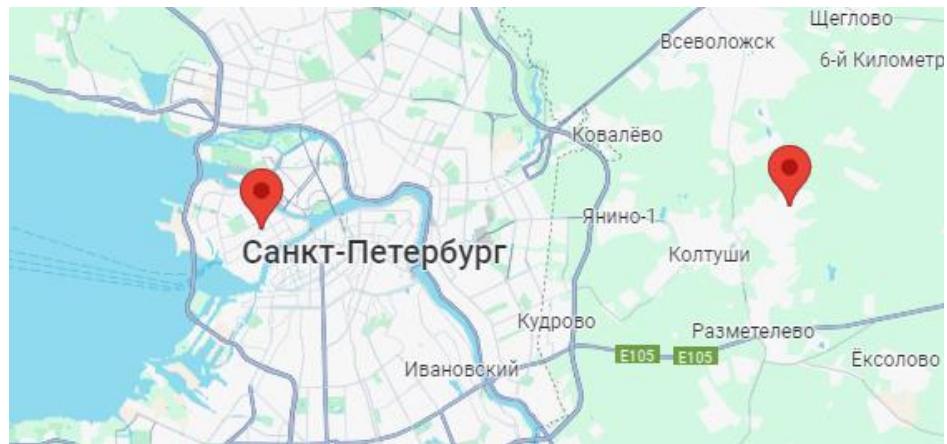


Рисунок 55 – Схема расположения площадок наблюдений

Nd:YAG лазер работает на трех длинах волн: 355 нм, 532 нм и 1064 нм. Использование лазера с тремя гармониками позволяет восстановить функцию распределения частиц по размерам. Слепая зона лидара составляет 300 м и связана с расположением оптических элементов. Ветровой лидар позволяет измерять скорость и направление ветра с высоты 40 м. В импульсном допплеровском ветровом лидаре используется длина волны 1557 нм. Подробно характеристики мобильного и стационарного лидарных комплексов приведены в статье [255].

Для восстановления оптических параметров атмосферы используется основное уравнение лидарного зондирования:

Задача восстановления распределения аэрозоля по размерам обычно формулируется в виде уравнений Фредгольма второго рода:

$$\alpha_i = \int_0^{\infty} K_{\alpha}(m, r, \lambda_i) f(r) dr \quad (13)$$

$$\beta_i = \int_0^{\infty} K_{\beta}(m, r, \lambda_i) f(r) dr \quad (14)$$

где r – радиус частицы, m – комплексный показатель преломления, λ_i – длины волн, используемые в зондировании, $K_{\alpha}(m, r, \lambda_i)$ и $K_{\beta}(m, r, \lambda_i)$ – ядра интегрального уравнения для

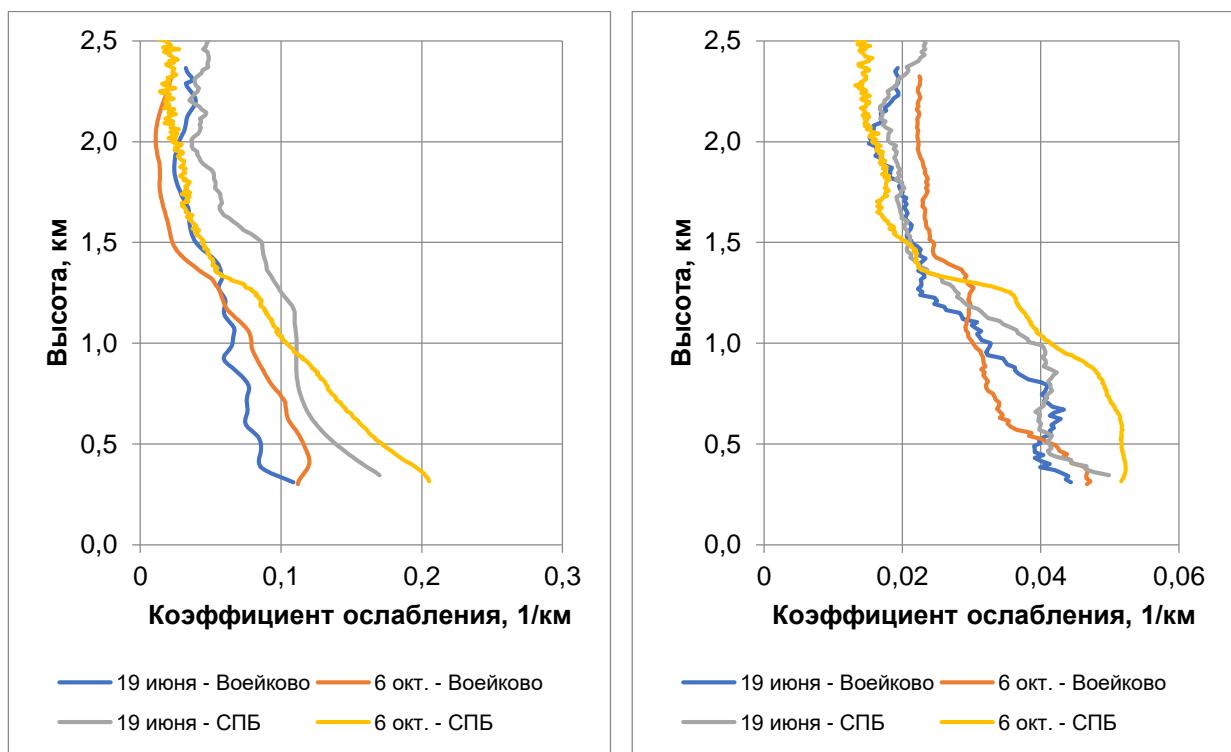
случая сферических частиц, вычисляемые на основе теории Ми, $f(r)$ – распределение частиц по размерам.

Уравнения (13, 14) не имеют аналитического решения. Одним из методов, используемых при рассмотрении данной обратной задачи, является метод регуляризации, предложенный Тихоновым [219].

Данные, полученные аэрозольным лидаром, были обработаны с использованием программного обеспечения DataProcessing «ООО Оптосистемы», разработанного для СПбГУ. Программа предназначена для обработки данных многоволнового лидарного зондирования, сохраненных в файлах формата LiceL или в текстовом формате.

Однократные наблюдения проводились в течение 2-3 часов и впоследствии были усреднены. После основных наблюдений аэрозольным лидаром проводились однократные измерения вертикального профиля параметров ветра с помощью допплеровского лидара.

Синхронные лидарные измерения с использованием мобильного и стационарного лидарных комплексов позволили оценить различия профилей аэрозолей в Санкт-Петербурге и Ленинградской области вблизи п. Воейково. Измерения выполнены в летний и осенний сезон 2023 г. Измерения проводились в дневное время суток, захватывали момент запуска метеозонда в 15 ч, что позволило регистрировать скорость и направление ветра по данным ветрового лидара и метеозонда. Стоит отметить, что дискретность определения скорости и направления ветра с использованием имеющегося в ресурсном центре СПбГУ лидара составляет 37,5 м, а у метеозонда сотни метров (Рисунок 56).



A

B

Рисунок 56 – Коэффициенты ослабления в Воейково и Санкт-Петербурге (СПБ) 19 июня и 6 октября: А) на длине волны 355 нм; В) на длине волны 532 нм

Коэффициент ослабления в целом в Воейково меньше, чем в Санкт-Петербурге. Максимальные значения в городе не превышали $0,21 \text{ км}^{-1}$ в ультрафиолетовом спектре. В видимом диапазоне спектра значения коэффициента ослабления находились в пределах от $0,005$ до $0,052 \text{ км}^{-1}$. Как видно из графиков, в момент проведения измерений наблюдалась нестабильная изменчивость параметров.

Оптическая толщина в слое от $0,35$ до 2 км в среднем по двум измерениям составила в Воейково $0,099$ и $0,049$ на длине волны 355 и 532 нм соответственно, в Санкт-Петербурге – $0,157$ и $0,054$. Среднее значение параметра ангстрема в Воейково равнялось $1,72$, в Санкт-Петербурге – $2,62$ (Рисунок 57).

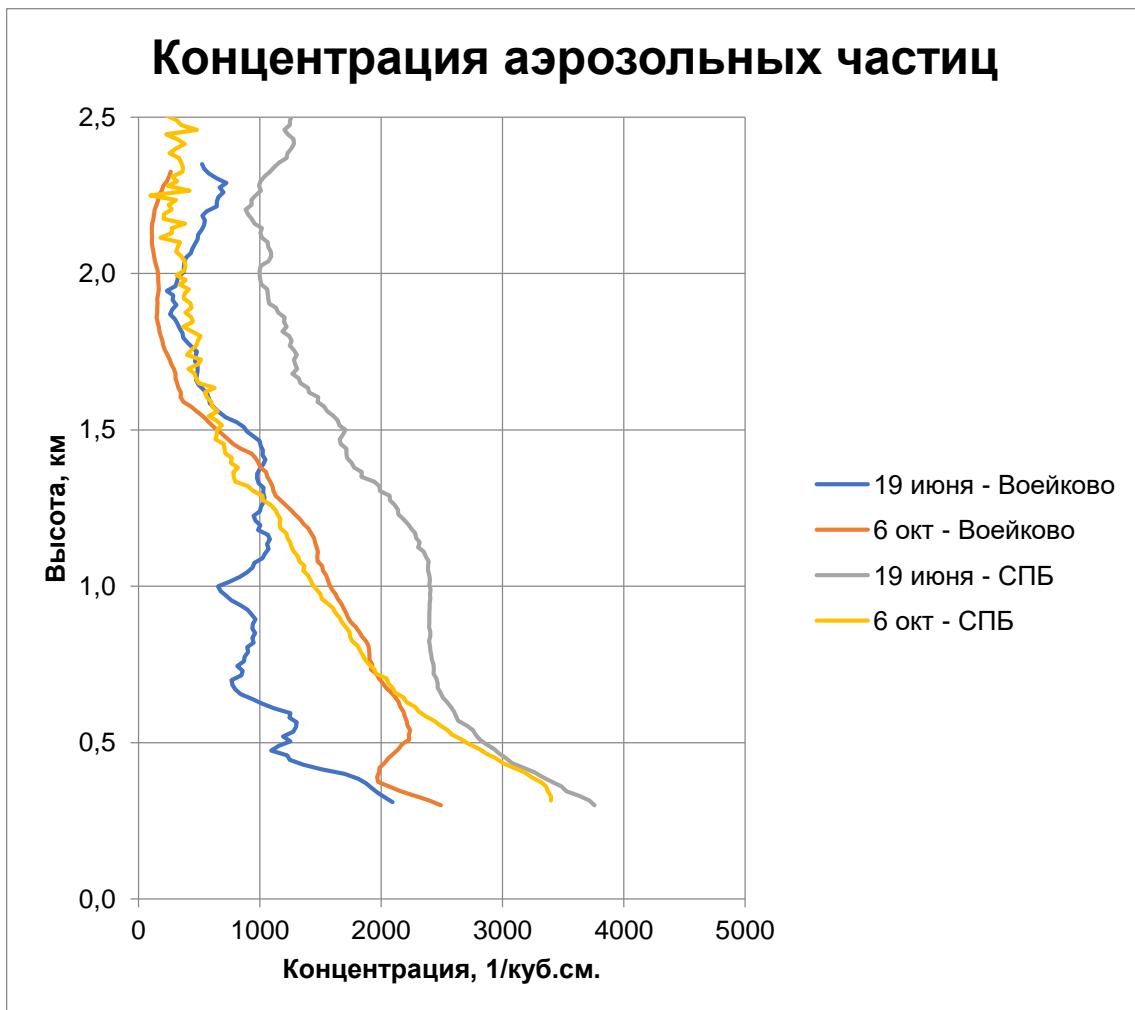


Рисунок 57 – Вертикальные профили концентрации аэрозольных частиц в Воейково и Санкт-Петербурге (СПБ) 19 июня и 6 октября

Наибольшая концентрация аэрозольных частиц наблюдалась над Санкт-Петербургом 19 июня. В Воейково в тот же день наблюдалось многочисленное количество

аэрозольных слоев, что может означать наличие турбулентности в атмосфере. Разница в концентрации летом была более ярко выражена, чем осенью. Это можно объяснить тем, что перемещаемые над пунктами наблюдения воздушные массы имели различный путь. На рисунке 58 изображены вертикальные профили направления ветра по данным ветрового лидара и аэрологического зондирования, проведенного в Воейково. Ветер в день проведения измерений осенью был северо-западным, летом – преимущественно северо-восточным. Данные радиозондирования и лидара 19 июня имели расхождения по высоте, но схожий характер смещения направления на северное. Лидаром фиксировалась некоторая изменчивость направления ветра в столбе. Данные показывают, что летом в Воейково воздушная масса двигалась с Ладожского озера, а в западную часть города вошла, пройдя над его центром и близлежащими территориями, включающими как жилые, так и производственные районы. Осенью воздушная масса, детектируемая над Васильевским островом, прошла вдоль северного берега Финского залива. Над Воейково воздушная масса прошла над северными территориями Ленинградской области, минуя город, что объясняет менее сильную разницу по концентрации частиц, чем летом.

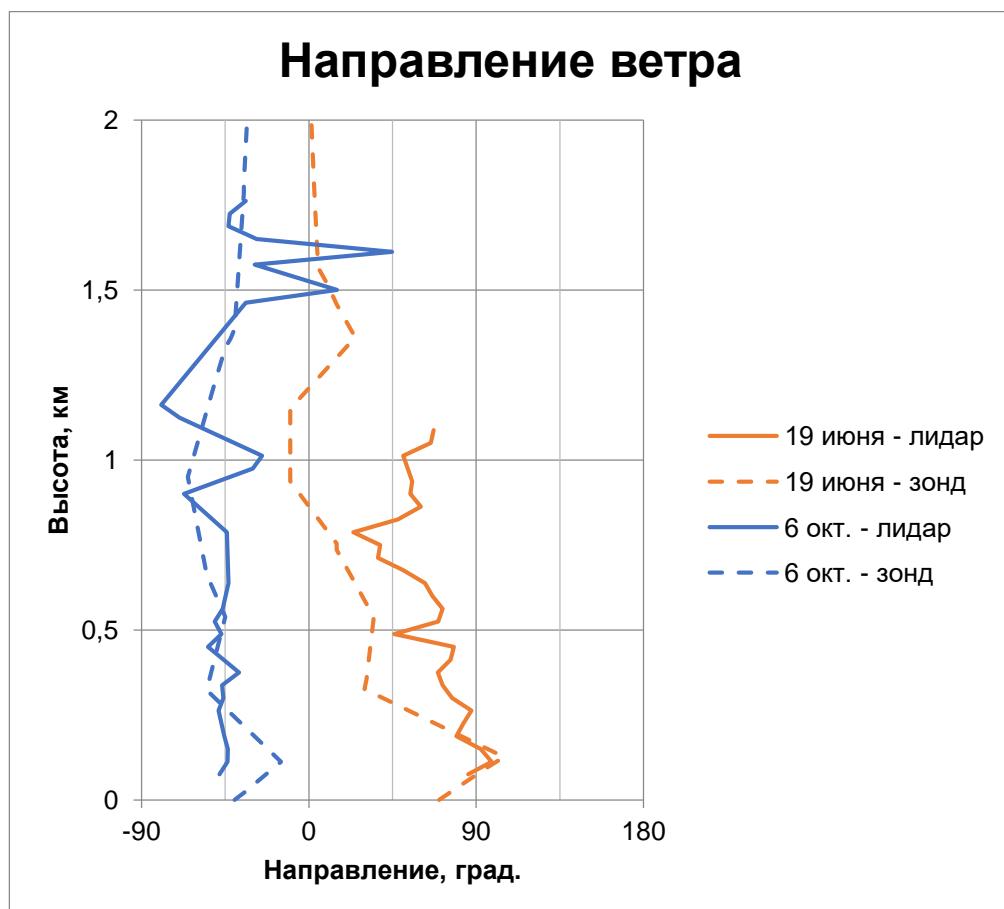


Рисунок 58 – Вертикальные профили направления ветра в Воейково и Санкт-Петербурге
19 июня и 6 октября

Концентрация аэрозолей в столбе воздуха от 350 м до 2 км, составляет в Воейково в летний период $1,44 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^2$, в Санкт-Петербурге – $3,47 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^2$; в осенний период в Воейково – $2,03 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^2$, в Санкт-Петербурге – $2,22 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^2$. Результаты исследований представлены в таблице 35. В осенний период содержание аэрозольных частиц между Санкт-Петербургом и п. Воейково отличается незначительно, с преобладанием аэрозолей над мегаполисом, что связано с направлением воздушных масс (Рисунок 59). Содержание аэрозольных частиц в Санкт-Петербурге, при прохождении воздушной массы вдоль берега Финского залива практически равно содержанию аэрозольных частиц в Воейково в осенний и летний сезон, что подтверждает предположение о том, что основной вклад в загрязнение атмосферы аэрозольными частицами над Санкт-Петербургом вносят источники, располагающиеся в Санкт-Петербурге и поблизости от города. Результаты измерений, выполненных в п. Воейково, хорошо соотносятся с результатами измерений, выполненными в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в 2020 году [253].

Таблица 35 – Результаты измерений

Параметр	Воейково	Санкт-Петербург
Оптическая толщина	355 нм	0,099
	532 нм	0,049
Ангстрем	1,72	2,62
Концентрация аэрозольных частиц в столбе воздуха от 350 м до 2 км, 10^{12} 1/m^2	Лето	1,44
	Осень	2,03
		3,47
		2,22

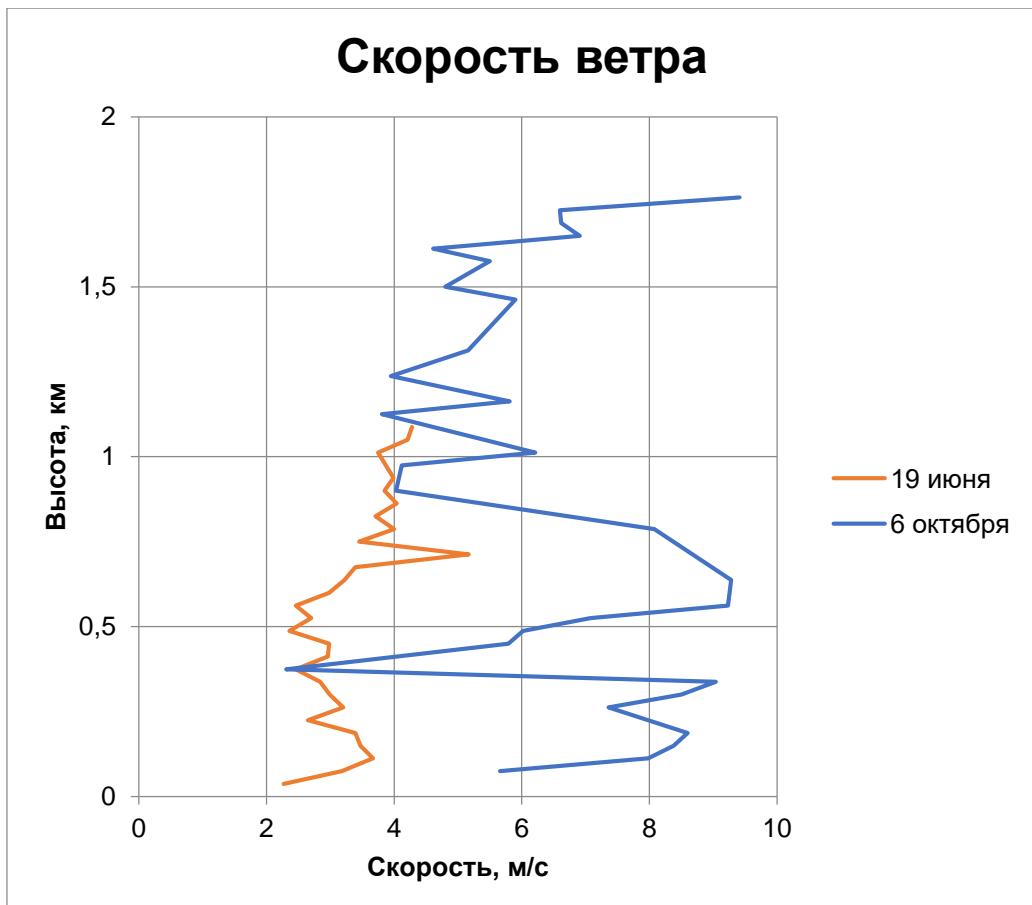


Рисунок 59 – Вертикальные профили скорости ветра, полученные с помощью лидара 19 июня и 6 октября

Синхронные измерения с применением стационарного и мобильного лидарных комплексов позволили оценить вертикальное распределение аэрозолей в дневное время суток в мегаполисе и на некотором удалении от него. Осеню воздушная масса, детектируемая над Васильевским островом, прошла вдоль северного берега Финского залива. Над Воейково воздушная масса прошла над северными территориями Ленинградской области, минуя город, что объясняет меньшую разницу в концентрациях частиц между пунктами наблюдений осенью. Летом, когда воздушная масса, анализируемая над Воейково, прошла через территории, прилегающие к Ладожскому озеру, а над Васильевским островом над северо-восточной частью города и его окрестностями, разница в концентрациях аэрозольных частиц была более ярко выраженной.

Также стоит отметить, что содержание аэрозольных частиц в атмосфере в значительной степени зависит от метеорологических условий. Скорость ветра напрямую влияет на степень рассеивания примесей и процессы перемешивания в атмосфере. При достаточной силе ветра происходит уменьшение численной концентрации аэрозолей в атмосфере. В осенний сезон скорость ветра была в 2-3 раза выше (Рисунок 59), чем в летний

сезон, что также оказало влияние на процессы накопления и рассеивания аэрозолей в атмосфере.

В осенний период разница в загрязнении атмосферы в Санкт-Петербурге и п. Воейково аэрозольными частицами незначительна в отличие от летнего периода. При этом содержание аэрозолей осенью в Санкт-Петербурге при прохождении воздушной массы вдоль берега Финского залива практически равно содержанию аэрозольных частиц в п. Воейково летом и осенью. С учетом траектории движения воздушных масс это показывает, что основной вклад в загрязнение атмосферы аэрозольными частицами над Санкт-Петербургом идет от источников, располагающиеся в Санкт-Петербурге или вблизи города.

Оптические и микрофизические данные, полученные для города Санкт-Петербурга и пригорода п. Воейково с относительно чистой атмосферой, согласуются с аналогичными экспериментами, проводимыми с использованием спектрофотометров сети AERONET и данных спутникового радиометра VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), где оценивается содержание аэрозолей на территориях мегаполисов и вблизи них [256-258].

Большее содержание аэрозолей над Санкт-Петербургом по сравнению с п. Воейково уменьшает количество прямой солнечной радиации и увеличивает долю рассеянной радиации. При относительно небольшом расстоянии между площадками наблюдений имеется пространственная неоднородность в поступлении солнечной радиации над мегаполисом и в Ленинградской области. Полученные результаты также подтверждаются исследованием [259]. Изменения и вариации содержания аэрозолей и, следовательно, поступления УФ радиации в значительной степени зависят от метеорологической обстановки.

На снижение уровня содержания аэрозолей осенью по сравнению с летним сезоном влияет выдувание и вымывание большей части накопленных за зиму аэрозольных частиц. Осадки – один из основных процессов, ведущих к очищению атмосферы от загрязнений.

Оптическая толщина в слое от 0,35 до 2 км в среднем по двум измерениям (летом и осенью) составила в Воейково 0,099 и 0,049 при длинах волн 355 и 532 нм соответственно, в Санкт-Петербурге – 0,157 и 0,054. Среднее значение параметра ангстрема в Воейково равнялось 1,72, в Санкт-Петербурге – 2,62. В то время как в Воейково наблюдалась смесь мелко- и крупнодисперсного аэрозоля, в Санкт-Петербурге преобладал мелкодисперсный аэрозоль.

В летний период содержание аэрозольных частиц в столбе воздуха от 350 м до 2000 м в Воейково составило $1,44 \cdot 10^{-12} \text{ 1/m}^2$, в Санкт-Петербурге – $3,47 \cdot 10^{-12} \text{ 1/m}^2$ в летний период; в осенний период в Воейково – $2,03 \cdot 10^{-12} \text{ 1/m}^2$, в Санкт-Петербурге – $2,22 \cdot 10^{-12} \text{ 1/m}^2$. На станции Воейково, расположенной вне городской зоны, во все дни наблюдений

фиксирулось меньшее содержание аэрозольных частиц. Разница в концентрации летом была более ярко выражена, чем осенью. Это можно объяснить тем, что перемещаемая над пунктами наблюдения воздушная масса имела различный путь.

7.1.7 Распределение аэрозольных частиц в Ленинградской области по пути направления ветра от г. Санкт-Петербурга

Плохое качество воздуха, связанное с повышенной аэрозольной нагрузкой, регистрируется по всему миру и является серьезной проблемой многих городов Европы, Азии, Южной и Серной Америки [260-263].

Из-за высокой плотности населения, быстрого экономического роста и резких темпов урбанизации аэрозольные загрязнения оказывают серьезнейшее негативное воздействие в мегаполисах, примером могут служить города Индии и Китая, когда в следствие интенсивного развития промышленности многократно возросла аэрозольная нагрузка [264-267]. Загрязнение атмосферного воздуха аэрозолем является серьезной проблемой в Европе, при этом проводимыми мероприятиями удается снизить уровень загрязнения твердыми частицами в странах ЕС [268].

Основными источниками аэрозольных загрязнений в континентальной Европе являются: почвенная пыль, горение, сжигание биомассы, промышленные выбросы, биогенные выбросы, автомобильный транспорт, вторичные сульфаты, морская соль, строительные и дорожные работы. В отопительный сезон основными источниками загрязнения являются сжигание биомассы и продуктов сгорания топлива, в то время как летом, помимо почвенной пыли, это вторичные аэрозоли и биогенные выбросы. Значимое воздействие автотранспорта и промышленности подтверждается исследованиями, проведенными в COVID период с 2018 по 2022 год в городе Дебрецен, Венгрия. Исследования показали, что сокращение дорожного движения и промышленного производства в связи с COVID ограничениями улучшило качество воздуха в городе на 20-25% [269].

Аэрозольные частицы, характеризующиеся малым аэродинамическим диаметром (менее 10 мкм (PM10)), содержат опасные для окружающей среды компоненты, состав которых сильно меняется в зависимости от места забора проб. Как правило исследования направлены на изучение высоких концентраций РМ частиц в мегаполисах. При этом, в отдельных исследованиях [270] отмечается, что сильное загрязнение аэрозолем характерно как раз для городов с населением менее 1 миллиона человек. В большинстве таких городов, как правило, отсутствуют станции наземного мониторинга аэрозольных частиц.

В России очень обширная территория, и уровень загрязнения аэрозолем сильно отличается в зависимости от месторасположения города, отмечается в таких городах как Москва, Краснодар, Челябинск, Екатеринбург [271].

Исследование загрязнения городов Сибири показало существенное превышение аэрозольных загрязнений в промышленных городах, которое значительно отличалось от значений на периферии [272]. Синхронные исследования аэрозольной оптической толщи, проведенные с помощью солнечных фотометров в г. Екатеринбург и на фоновой площадке, расположенной в 65 км от города, показали, наличие существенного вклада выбросов города в величину аэрозольной оптической толщи, которая была над городом Екатеринбургом выше на 21 - 39 процентов по сравнению с фоновой площадкой [273,274]. В приземном слое г. Томска объемная концентрация мелкодисперсного аэрозоля выше в 2-3 раза, среднедисперсного в 4-5 раз и крупнодисперсного аэрозоля в 25 раз выше, чем в пригороде [275].

Причины повышенного уровня аэрозолей связаны, как с локальными выбросами загрязняющих веществ, так и из-за адвекции аэрозольных частиц из отдаленных районов.

Различия в содержании аэрозольных частиц обусловлено множеством факторов, включая расположение источников загрязнений в черте города Санкт-Петербурга и на его периферии, размерами аэрозольных частиц, атмосферными условиями, рельефом и др. Ветер играет ключевую роль в перемещении и рассеивании аэрозолей. Он переносит аэрозоли на большие расстояния, влияет на концентрацию и распределение аэрозолей в атмосфере. Направление и скорость ветра определяют, как быстро и в каком направлении аэрозоли будут перемещаться. Сильный ветер поднимает пыль в атмосферный воздух, создавая условия для дальнейшего распространения аэрозолей. При высокой скорости ветра аэрозоли уносятся на большие расстояния и рассеиваются на большую площадь, в то время как при низкой скорости ветра начинают преобладать процессы осаждения аэрозолей. Тurbulentные потоки способствуют более равномерному распределению аэрозолей. При повышенной влажности происходят процессы конденсации на аэрозольных частицах, что сильно влияет на процессы их рассеивания и осаждения. Стоит учитывать наличие естественных и искусственных преград, перепадов высот, которые влияют на распространение аэрозолей.

В настоящей работе авторами проведено исследование распределения аэрозольных частиц при удалении от г. Санкт-Петербурга по пути направления ветра, что позволяет дать оценку переносу и рассеиванию аэрозолей, образующихся над Санкт-Петербургом и сопредельных регионах.

Мобильный лидарный комплекс состоит из аэрозольного лидара на базе Nd:YAG лазерного излучателя и ветрового допплеровского лидара.

Для восстановления оптических параметров атмосферы использовалось уравнение лидарного зондирования.

Расчёт оптических параметров, выполнялся по методу Клетта. Задача восстановления распределения аэрозоля по размерам обычно формулируется в виде уравнений Фредгольма второго рода:

При проведении конусного сканирования с допущением горизонтальной однородности вектора ветра, вычисляются его параметры такие как: направление и скорость, а также вертикальная составляющая.

Проведение лидарных наблюдений возможно при условии отсутствия осадков, тумана и дымки, плотной облачности нижнего и среднего яруса.

Для расположения мобильного лидарного комплекса необходимо не наклонное (угол не более 5°) твердое покрытие. С учетом необходимого времени на передислокацию, развертывание и сворачивание комплекса, проводилось 2-3 измерения в зависимости удаленности от места выезда мобильного лидарного комплекса на расстоянии до 35 км от города.

Неотъемлемой частью проведения исследования является направление ветра. Санкт-Петербург имеет не равномерное распределение направления ветра как в среднем за год, так и за сезоны (Рисунок 60). Кроме того, следует учитывать, что приземное направление ветра как правило отличается от высотного.

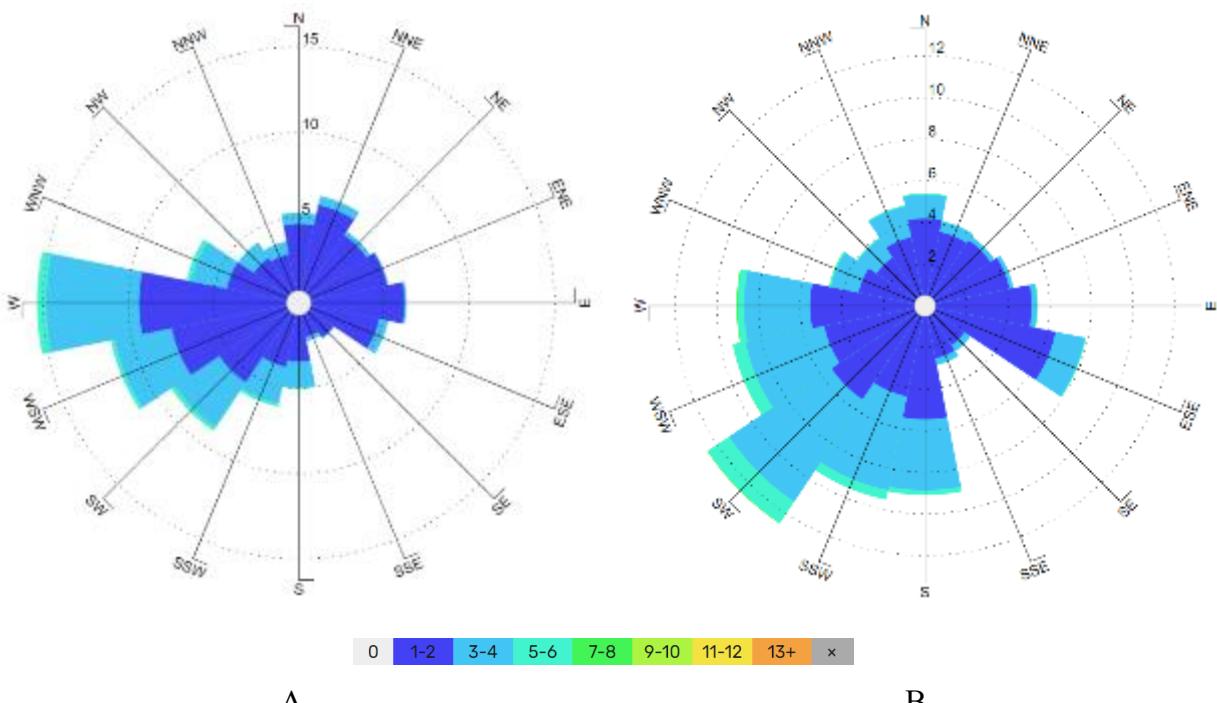


Рисунок 60 – Роза ветров Санкт-Петербурга летом (А) и осенью (В). (с 2008 по 2018 гг.

источник <https://lakka-sails.ru/winds/26063#all>, дата обращения 04.10.2024)

Всего выполнено 7 полевых исследований: 2 при северо-восточном ветре, 2 при юго-западном, 2 при западном и 1 при южном (Рисунок 61). Полевые исследования проводились в мае (17, 21), июне (5), июле (11, 23) и сентябре (6, 20).

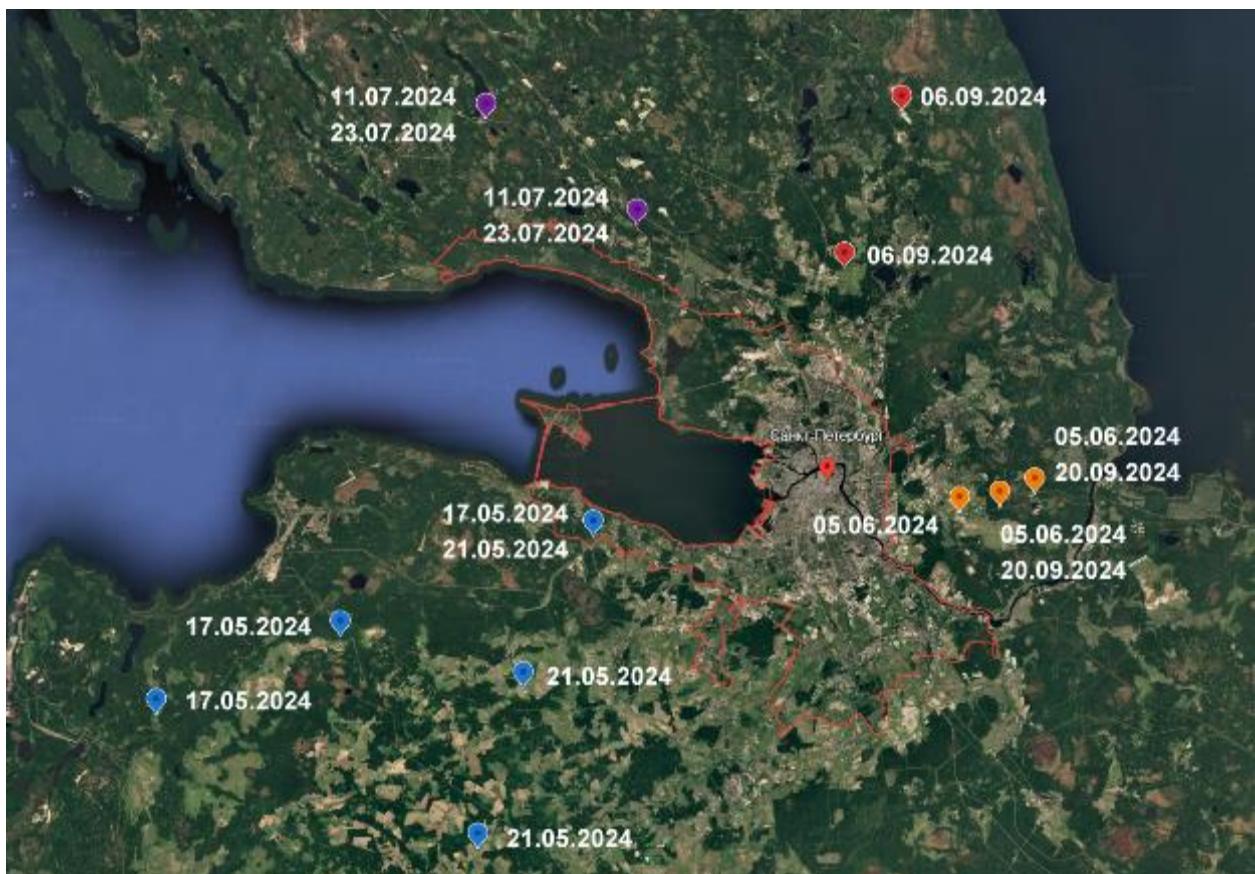


Рисунок 61 – Расположение площадок наблюдений

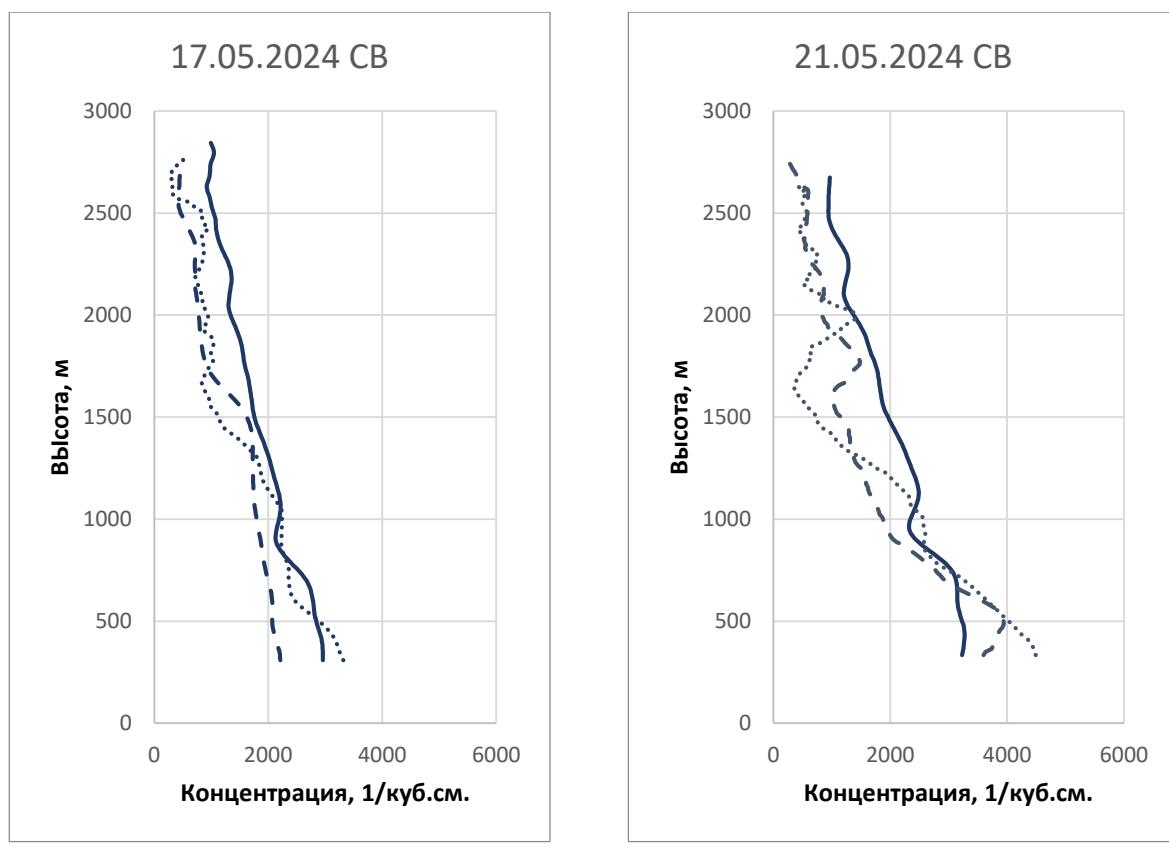
Во время проведения измерений медианная по высоте скорость ветра в основном варьировалась в пределах от 3 до 7 м/с, за исключением второй точки наблюдений 20 сентября, когда она равнялась 9 /м/с.

Площадки наблюдений вокруг города располагаются на приблизительно равноудаленном расстоянии в 25 - 35 км, за исключением западного направления ветра. Расстояние между площадками наблюдений отличается ввиду отсутствия возможности развернуть комплекс и провести измерение при наличии высотных сооружений, древостоя, локальных источников выбросов аэрозолей, а также наличия естественных преград таких как Ладожское озеро, ввиду чего расстояние между площадками при западном направлении ветра минимально.

Большинство площадок наблюдений располагались на съездах автодорог как на грунтовой поверхности, так и в полях. При юго-восточном ветре места для проведения измерений выбирались на площадках для отдыха водителей на трассе «Скандинавия».

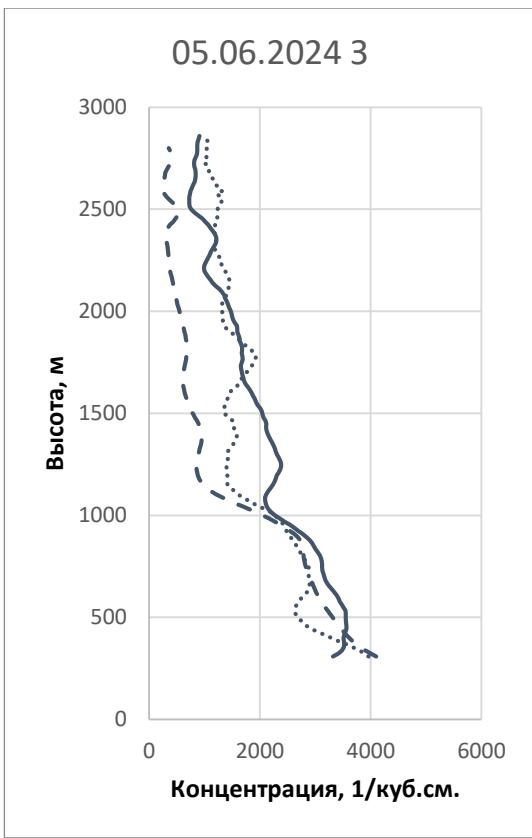
Накопление данных осуществлялось в течение 45 - 60 минут на каждой площадке. Измерения ветровым лидаром проводились до и после измерений аэрозольным лидаром. В качестве итоговых профилей параметров ветра рассчитывались средние значения направления и скорости ветрового потока.

Результаты восстановления профилей концентраций аэрозольных частиц в местах наблюдений приведены на Рисунке 62. Как видно из графиков, концентрация частиц в среднем падает с увеличением высоты. Максимальные значения как правило отмечались на нижней границе наблюдений., находились в пределах от 2000 до 4000 частиц в куб. см. Также в отдельные дни наблюдаются повышенные концентрации аэрозоля на различных высотах, связанные с перемещением аэрозольных масс.

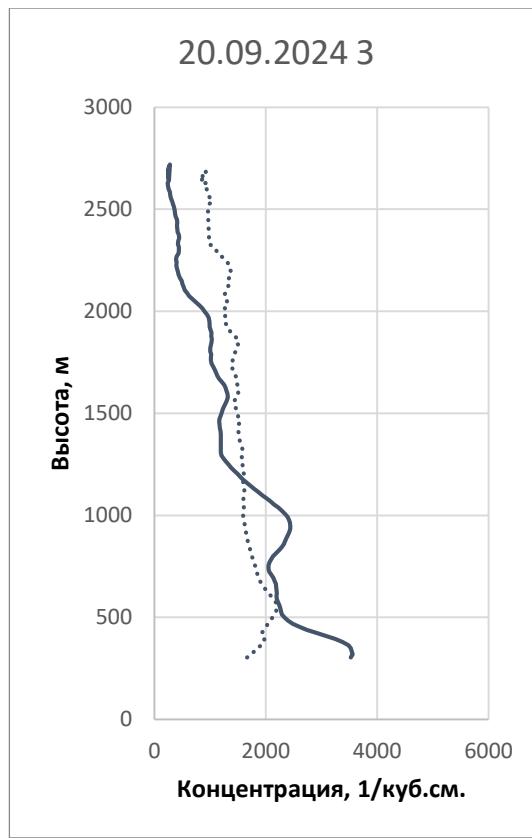


A

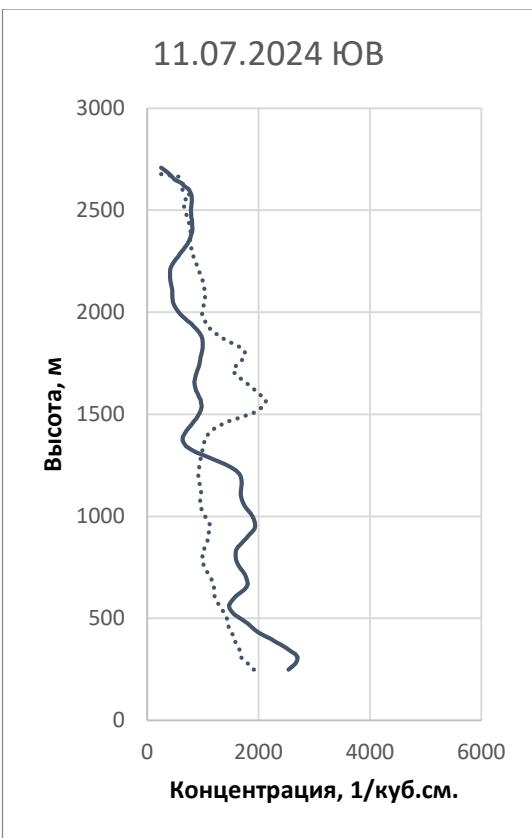
B



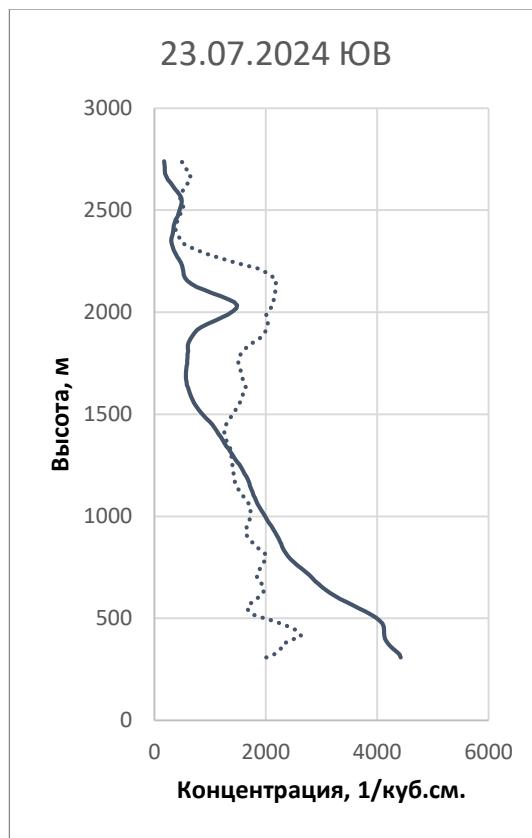
C



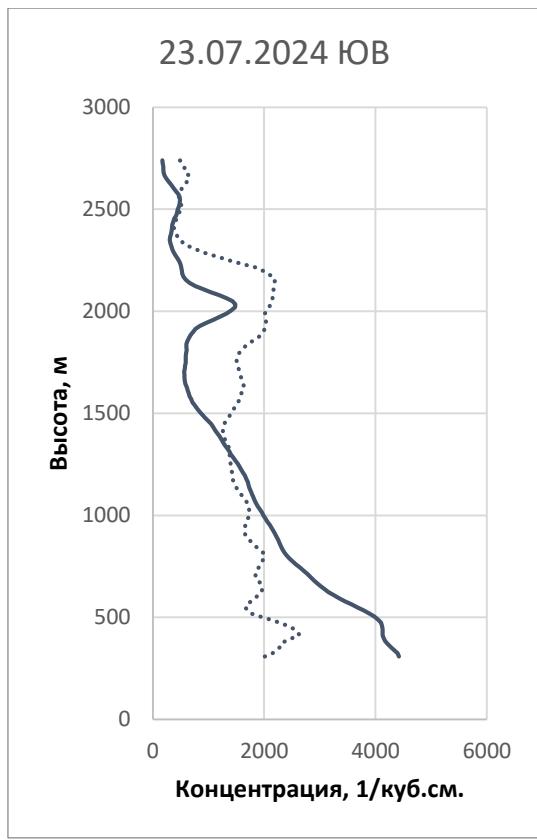
D



E



F



G

Рисунок 62 – Вертикальные профили концентраций аэрозольных частиц при удалении от города (сплошная линия – первая и ближайшая площадка к городу, пунктир – вторая площадка, тире – третья площадка (при наличии) на наибольшем удалении от города)

Для оценки суммарного содержания аэрозольных частиц в атмосфере на разных площадках использовался интеграл концентрации аэрозольных частиц в столбе воздуха от 350 м до 2 км в столбе площадью 1 кв. см. (Рисунок 63). По мере удаления воздушной массы от города количество частиц в столбе воздуха уменьшается, что говорит о рассеивании и осаждении аэрозольных частиц, а также об отсутствии значимых дополнительных источников выбросов по пути следования воздушной массы. Снижение концентрации аэрозольных частиц различается при разных направлениях ветра и, зависит от расстояния между площадками наблюдений, скорости ветра, зарегистрированного в каждый конкретный день наблюдений. Максимальные значения численной концентрации частиц находятся в пределах от 300 до 400 млн частиц на площадках ближе всего расположенных к городу.

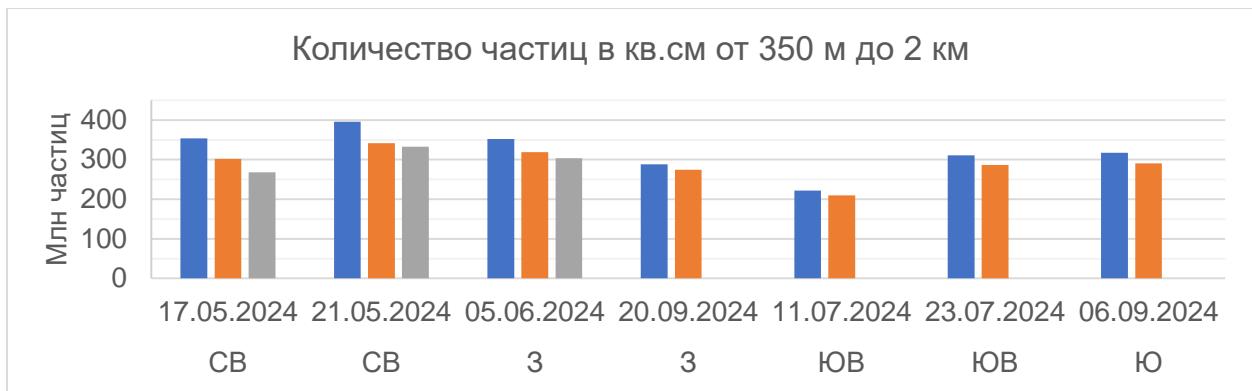


Рисунок 63 – Количество частиц в квадратном сантиметре на высотах от 350 м до 2 км на местах наблюдений с указанием направления ветра. (синий – ближайшая точка к городу, желтый – на удалении от первой точки, серый – на наибольшем удалении от города).

При северо-восточном направлении ветра, снижение концентрации аэрозолей между площадкой 1 и 2, и между 2 и 3 составляет 17.05.2024 51 и 34 млн. частиц, 21.05.2024 54 и 9 млн частиц.

При западном направлении ветра концентрация аэрозолей одна между площадками наблюдений снижается на 33 и 15 млн частиц между площадками 1 и 2, и площадками 2 и 3 - 05.06.2024, и на 14 млн между площадками 1 и 2 - 20.09.2024.

При юго-восточном направлении ветра (11.07.2024 и 23.07.2024) концентрация аэрозолей одна между площадками наблюдений снижается на 12 и 24 млн. частиц соответственно.

При южном направлении ветра (06.09.2024) концентрация аэрозолей снижается на 27 млн частиц между площадками наблюдений.

Расчет тенденции снижения количества аэрозольных частиц при удалении от города Санкт-Петербурга показал, что максимальное снижение наблюдалось 5 июня при западном направлении ветра - 3.3 млн частиц за километр, наименьшее 11 июля при юго-восточном ветре - 0.5 млн частиц за километр.

Комбинированное применение аэрозольного и ветрового лидаров в едином комплексе позволило провести оценку пространственно-временного распределения аэрозолей по пути следования воздушных масс при направлении ветра от города Санкт-Петербурга в Ленинградскую область. Максимальное содержание аэрозольных частиц наблюдалось в пограничном слое атмосферы на высоте до 1 километра. При удалении от города концентрация аэрозольных частиц в столбе воздуха снижается, что связано с меньшим образованием вторичного аэрозоля антропогенного происхождения в Ленинградской области, по сравнению с г. Санкт-Петербургом, где аэрозоль образуется в

больших количествах ввиду активного автотраффика и наличия большого количества промышленных предприятий. Максимальные значения численной концентрации частиц находятся в пределах от 300 до 400 млн частиц на площадках ближе всего расположенных к городу за исключением 20 сентября (288 млн частиц) при западном направлении ветра и 11 июля (222 млн частиц) при юго-восточном. Большие объемы аэрозолей, образующиеся над г. Санкт-Петербург, осаждаются и рассеиваются по пути следования воздушной массы, что приводит к дополнительной нагрузке на граничащие с Санкт-Петербургом районы. Различия в содержании аэрозолей, ведет к различиям в поступлении солнечной радиации, температурного режима и видимости.

7.1.8 Алгоритм оценки пространственно-временного распределения аэрозолей на Европейском континенте по данным многолетнего лидарного зондирования

Для восстановления оптических параметров атмосферы используется основное уравнение лидарного зондирования:

$$P(z) = A \frac{\beta(z)}{z^2} e^{-2 \int_0^z \alpha(z') dz'} \quad (13)$$

где $P(z)$ – мощность детектируемого обратно рассеянного сигнала с высоты z , A – аппаратная константа, $\beta(z)$ – коэффициент обратного рассеяния, $\alpha(z')$ – коэффициент ослабления, $\int_0^z \alpha(z') dz'$ – аэрозольная оптическая толщина.

Лидарный метод позволяет восстановить вертикальный профиль аэрозольных частиц, оценить изменчивость аэрозольных слоёв во времени, что сделать детализировано другими методами проблематично. Расчёт оптических параметров — коэффициентов ослабления и обратного рассеяния, выполненный по методу Клетта, даёт погрешность до 20 % и зависит от содержания аэрозоля, его типа, а также от состояния атмосферы.

В зависимости от типа аэрозоля лидарное соотношение может сильно варьироваться. Для выявления наиболее оптимального значения лидарного соотношения, использовался Романовский сигнал также имеющейся в общем массиве данных европейских станций.

Для уточнения значения лидарного соотношения на станции в Санкт-Петербурге помимо исследований методом Рамана в вечернее время, проводилась процедура восстановления микрофизических параметров аэрозоля. При решении такой обратной задачи методом регуляризации Тихонова, можно получить параметр невязки, который характеризует, насколько найденное решение соответствует исходным оптическим данным. Анализ восстановленных физических параметров аэрозолей и отклонения от исходных данных, при многочисленных итерациях позволяет минимизировать ошибку восстановления оптических параметров при выборе значения лидарного соотношения.

Для общей обработки данных написана программа на языке Python позволяющая обрабатывать большой массив данных, полученных со станций сети.

Данные группируются по станциям, каналам (355 и 532 нм) и типу (расчеты по методу Клетта или Рамана).

Разработан автоматический алгоритм фильтрации данных, включающий в себя:

- фильтрацию по недостаточному набору данных для исследуемого диапазона высот (до 3 км);
- корректировку общей нижней границы исследования на основе набора данных нижней границы исследований всех станций;
- фильтрация недостоверных данных по общим признакам (отрицательные или чрезмерно завышенные значения).

Измерения, произведенные за указанный промежуток времени (по умолчанию сутки), усредняются по высотам. В результате составляется усредненные за сутки профили оптических параметров атмосферы.

Для расчета оптической толщины использовались данные файлов измерениями, сделанными методом Raman, а также данные, рассчитанные методом Клетта. В случае отсутствия в Klett файлах параметра лидарного соотношения, используется значение, рассчитанное на основе среднего значения у Raman файлов для соответствующих высот.

Считанные данные с результатами вычислений записываются в excel файл. Для индивидуального диапазона высот для каждой станции записывается итоговое значение оптической толщины за все время наблюдений (набора данных). С учетом этого диапазона производится расчёт оптической толщины у Санкт-Петербургской станции на соответствующем диапазоне высот.

8 Оценка изменения параметров системы «питательная среда – зеленая водоросль – гуминовая кислота» во времени

Существование многих живых организмов связано с поглощением и выделением молекулярного кислорода. Он участвует во множестве физиологических процессов, и в принципе является необходимым компонентом для роста и развития большинства живых организмов. Но высокая концентрация кислорода также оказывает негативное действие на живые организмы, связанное с разрушениями различных клеточных компонентов [276, 277]. Этот эффект называется «окислительным стрессом».

В живом организме постоянно протекают различные окислительно-восстановительные реакции. В ходе реакций неполного (одно-, двух и трехэлектронного) восстановления кислорода образуются активные формы кислорода (АФК). На образование этих форм расходуется около 4 % всего поглощаемого кислорода клеткой, но при действии

определенных физических факторов, напр. при облучении ультрафиолетом, образование АФК способно увеличиваться [277]. Существует и другие экзогенные причины образования большого количества радикалов, такие как ионизирующее излучение, избыточное количество переходных металлов, побочные эффекты лекарственных препаратов и токсических химических веществ, избыток кислорода [278].

В настоящее время исследования, посвященные поиску веществ, способных снижать влияние избыточного кислорода, довольно распространены. Соединения, которые связывают неспаренные электроны, называют антиоксидантами (АО). Это может происходить либо в форме с образования неактивных радикалов или формирования электронной пары.

Вещества, обладающие антиоксидантной активностью (АОА), делятся на несколько категорий [279]: доноры протонов; полиены; катализаторы; ловушки радикалов; комплексообразователи. Можно утверждать, что ГВ, обладающие исключительно сложным и нерегулярным строением подпадают под все эти категории.

В первую группу АО относятся вещества, где донором протона являются вещества с легкоподвижным атомом водорода, который нейтрализует свободный радикал. Таким атомом, может выступать водород карбоксильных и гидроксильных групп ГВ.

Полиены – это группа антиоксидантных веществ, которые содержат в своей структуре несколько кратных связей. Активные формы кислорода могут атаковать ГВ по двойным и тройным связям в алифатических цепочках периферических частей молекул.

Катализаторы – вещества, которые повышают активность АО систем самих клеток. Не вступая в реакцию, такие соединения способствуют утилизации (элиминации) витамина С и глутатиона для связывания свободных радикалов. Вопрос о возможности проникновения ГВ или их фрагментов в клетку является дискуссионным, но ряд исследователей показывают, что такое возможно [280]. При этом активность ГВ в отношении природных объектов общепризнана и, возможно, напрямую не изменяясь в процессе химических реакций, ГВ могут стимулировать АОА.

Четвертая группа – ловушки радикалов – работают непосредственно в митохондриях [281], где тяжело представить участие ГВ.

Комплексообразователи связывают катионы металлов, которые могут инициировать образование активных форм кислорода и изменения молекул [282]. Например, в присутствии избытка железа токсичность H_2O_2 может увеличиваться от 10 до 1000 раз [283]. Безусловно, ГВ могут образовывать комплексы с различными катионами [278, 284], снижая их токсичность.

Методов для определения антиоксидантной активности существует большое количество [285]. Это электрохимические методы (вольтамперометрия), флуориметрические, биологические, а также спектроскопические и фотометрические.

Из-за сложности и уникальности строения ГК, они обладают различными физико-химическими свойствами, или типами взаимодействия в разных формах: ионного обмена, комплексообразования (координационная), окислительно-восстановительных и донорно-акцепторных (это ковалентная связь (координационная)) реакций и гидрофобных взаимодействий. Именно донорно-акцепторные и окислительно-восстановительные реакции и отвечают за АОА гуминовых кислот в природе. Многие реакции, в которых участвуют ГК, проходят по свободно-радикальному типу с участием неспаренных электронов [286], наличие которых в молекулах ГК не подлежит сомнению [287]. Количество неспаренных электронов можно оценить методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

ГК выступает в роли «ловушек» для короткоживущих свободных радикалов, что подтверждает метод электронно-парамагнитной спектроскопии [288]. многими исследованиями было показано, что ГК обладают АОА в отношении супероксид-анион-радикала – ключевой активной формой кислорода, взаимодействующей с клеточными белками [276, 289]. Ловушками свободных радикалов в молекулах ГК являются радикалы семихионного типа, которые активируют процессы восстановления кислорода, что и обуславливает АОА ГК [290].

Для оценки АО невозможно выбрать единый метод, который будет удобен для всех типов исследований. В жидкой среде АОА может быть оценена по изменению содержания растворенного кислорода. Эта информация указывает на участие кислорода в окислении компонентов окружающей среды (в т.ч. и ГК), потреблении живыми организмами при дыхании, либо выделении при фотосинтетической активности.

Содержание растворенного кислорода используют для оценки первичной продукции водоёмов [291]. При этом часть кислорода используется на дыхание живых организмов, а часть на окисление органических и минеральных веществ. Высокие концентрации кислорода могут угнетать живые организмы, в т.ч. фотосинтезирующие, вызывая окислительный стресс [292]. Низкое содержание кислорода диагностируется как анаэробные условия, что, чаще всего, рассматривается как негативное состояние.

Гуминовые вещества способны изменяться в природной среде, в т.ч. проявляя свои антиоксидантные свойства. Наиболее доступными для оценки изменения гуминовых веществ в растворе являются оптические (спектральные) методы. К ним относится измерение оптической плотности растворов (снятие спектров поглощения) и получение

спектров флуоресценции, а также спектров возбуждения флуоресценции. Гуминовые кислоты способны флуоресцировать в ответ на облучение ультрафиолетом (УФ) и светом в видимой области спектра [293-295]. В природных водах, где в растворе с гуминовыми кислотами могут находиться живые организмы и различные органические компоненты не гуминовой природы, эти компоненты могут также флуоресцировать. Наибольший же вклад в сигнал флуоресценции даёт хлорофилл, часто перекрывая свечение от других природных флуорофоров природного и антропогенного происхождения [289].

Исследования проводили, используя препарат ГК, выделенный из верхней пятисантиметровой толщи серой пахотной почвы по прописи С.Н. Чукова [287] Ранее было показано, что именно этот препарат обладает наиболее выраженной физиологической активностью в опытах, по его влиянию на культуру водоросли *Chlorella vulgaris*, среди других, выделенных нами и исследованных препаратов [296]. Во всех вариантах опыта, где присутствовала ГК, её концентрация в растворе составляла 0,003 % (по массе).

Представление об элементном составе препарата ГК получено посредством элементного CHN-анализатора LECO CHN628. По этому показателю содержание элементов составило: С – 52.8%, Н – 4.3%, N – 4.3%.

Количество структурных фрагментов ГК, таких как ароматические и алифатические, и некоторые функциональные группы, определено с использованием спектроскопии ЯМР на ядрах ^{13}C . Препарат демонстрирует высокое содержание ароматических фрагментов (отношение ароматических структурных фрагментов к алифатическим составило 0,61). Отношение гидрофильных фрагментов ГК к гидрофобным составляет 1.44. По этим показателям изученный препарат ГК близок к препаратам ГК чернозема целинного [296].

Одним из важнейших методов в изучении АОА является метод электронного парамагнитного резонанса. Концентрация свободных радикалов (КСР) была нами получена при помощи ЭПР спектрометра X-диапазона фирмы RadioPAN SE/X-2547 с диапазоном частот 8.8–9.5 ГГц, в качестве образца сравнения был использован препарат ДФПГ. Именно по КСР в ряду других ранее исследованных нами препаратов ГК серой пахотной почвы показывает наиболее высокое значение – $6,31 \cdot 10^{18}$ спин/г. По данным ЭПР-спектрометрии, исследуемый препарат ГК даёт практически симметричную синглетную линию с g-фактором спектроскопического расщепления, как у свободных радикалов семихинонного типа (Рисунок 64).



Рисунок 64 – Спектр ЭПР препарата ГК серой пахотной почвы

Данная работа является продолжением исследований влияния ГК на культуру водоросли, которую выращивали на питательной среде [31]. В настоящей работе все опыты были поставлены с использованием питательной среды Тамия, приготовленной по прописи согласно ПНД Ф 14.1:2:3:4.10-04.

Схема эксперимента включала в себя оценку поведения суспензии водоросль-ГК на свету и в темноте, а также ряд контрольных проб (гуминовая кислота и питательная среда без водоросли). Все варианты опыта выдерживали в темноте и на свету. Для решения поставленных задач проводили оценку ряда параметров суспензий, таких как содержание растворенного кислорода, оптической плотности, количества клеток и их размеров, интенсивность флуоресценции. Измерения проводились в момент постановки опыта, на 1 и 5 сутки. Схематичное представление постановки опыта представлено на Рисунок 65.

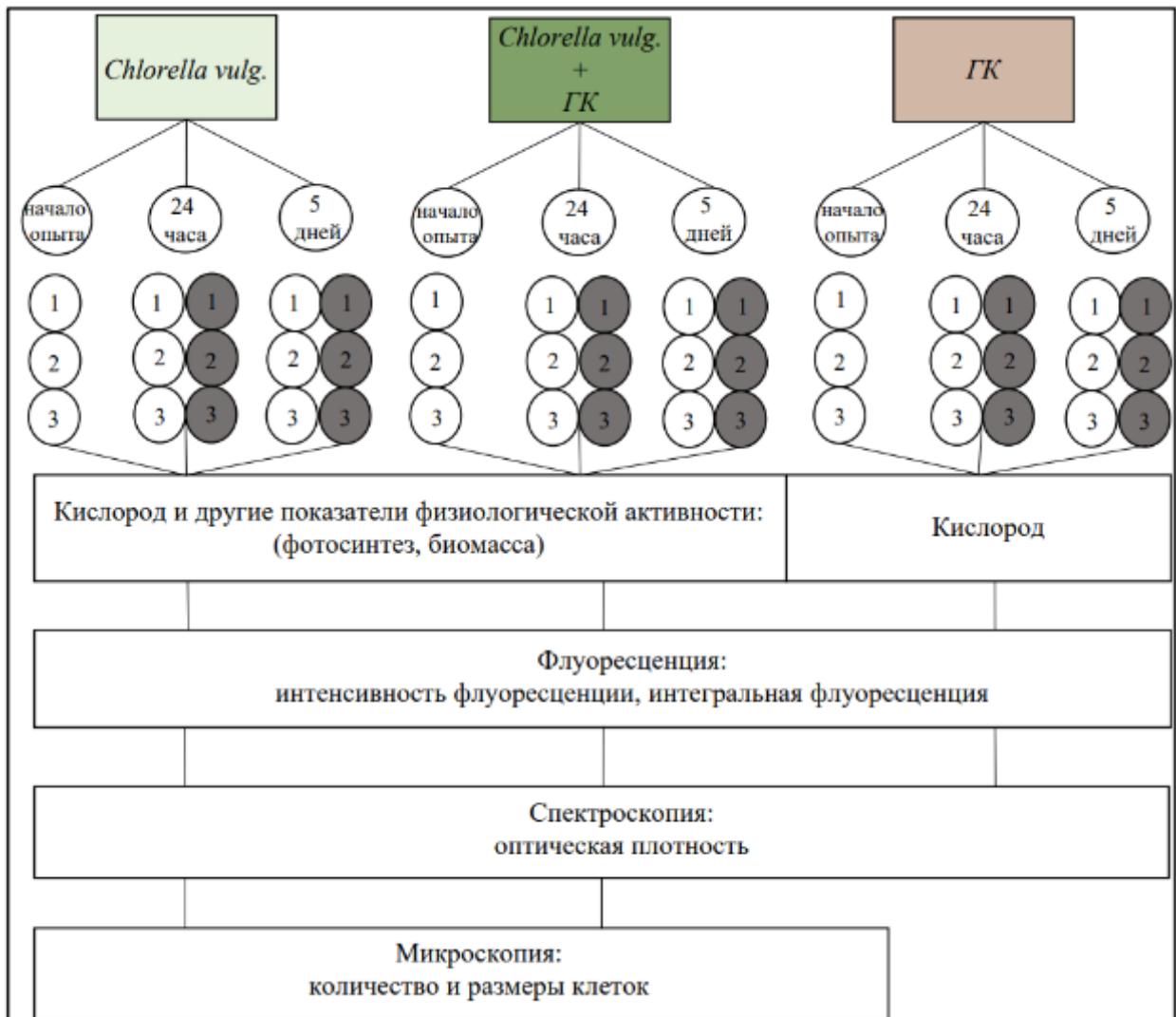


Рисунок 65 – Схема опыта

Для изучения влияния препаратов ГК были использованы показатели метаболизма *Chlorella vulgaris*, такие как величина первичной продукции, дыхания и прирост биомассы (Рисунок 66). Также был использован метод прямого счета количества клеток водоросли и их размеров, который позволяет напрямую охарактеризовать изменения, происходящие с культурой водоросли.

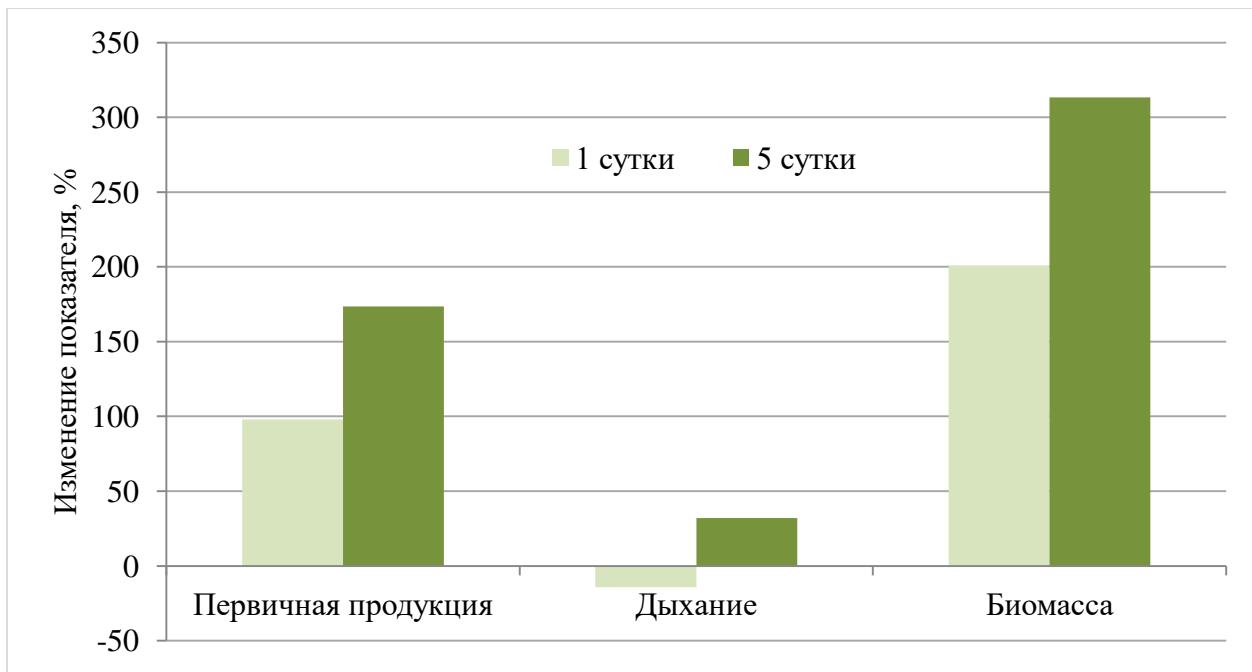


Рисунок 66 – Изменение показателей метаболизма водоросли на 1 и 5 сутки в присутствии ГК по сравнению с моментом постановки опыта (исходные значения приняты за 100 %).

В опыте по изучению физиологической активности препаратов гуминовых кислот был использован метод Винберга в кислородной модификации – по разности содержания кислорода в склянках с культурой *Chlorella vulgaris* после их инкубирования на свету и в темноте в течение 24 и 120 ч. Содержание кислорода определяли при помощи анализатора растворенного кислорода МАРК-302Э.

Для подсчета количества клеток использовали камеру Горяева; изображение получали с помощью цифрового окуляра-приставки Levenhuk C510 к оптическому микроскопу.

Количество клеток в 1 мл исследуемой суспензии вычисляли по формуле:

$$M = a \times 10^3 / Sh \quad (15)$$

где M – число клеток в 1 мл; a – среднее число клеток в квадрате сетки; S – площадь квадрата сетки, мм^2 ; h – глубина камеры, мм.

Информацию о размерах клеток получали с тех же фотографий, которые использовались для подсчета их количества. Программа, написанная на языке Python, выделяла имеющиеся клетки на фотографии и формировалась данные о площадях клеток в микрометрах.

Дополнительным параметром изменения состояния растворов и суспензий был показатель оптической плотности, полученный при помощи спектрофотометра UNICO

1201. Изначально мы использовали спектрофотометр для стандартизации постановки опыта – приведения суспензии культуры водоросли к оптической плотности порядка 0,1 для длины волны 680 нм. Нами отмечено, что эта характеристика изменяется со временем не только для суспензии хлореллы, но и для раствора гуминовой кислоты.

Интенсивность флуоресценции измеряли при помощи спектрофлуориметра PerkinElmer LS 55. Возбуждение флуоресценции проводили на двух длинах волн – 270 и 420 нм. Спектры флуоресценции снимали в диапазоне длин волн 280–800 и 440–800 нм, соответственно. Разницу для вариантов опыта оценивали по площади под кривые флуоресценции. Эксперименты по изучению интенсивности флуоресценции проводили для растворов и суспензий всех вариантов опыта. Пример спектров для различных вариантов опыта приведен на Рисунке 67.

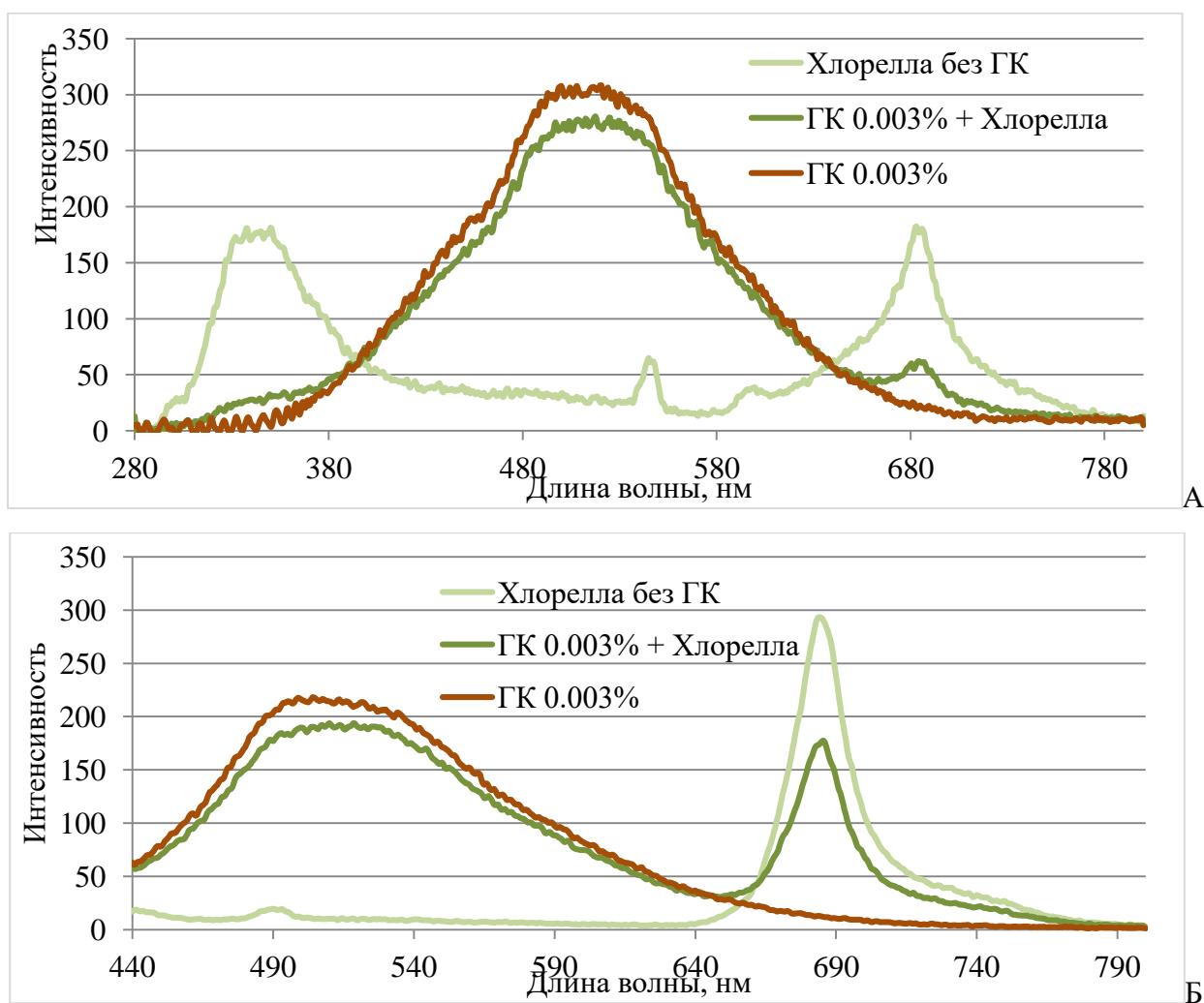


Рисунок 67 – Спектры флуоресценции для различных вариантов опыта для длины волны возбуждения 270 нм (А) и 420 нм (Б).

Влияние препарата ГК на культуру водоросли видно по изменению содержания кислорода и интенсивности флуоресценции на разных длинах волн возбуждения. Также

отмечается изменение оптической плотности суспензии клеток, диаметра клеток и их количества по отношению к контрольному опыту, где гуминовая кислота не вносилась.

В опытах было показано, что содержание растворенного кислорода снижается в присутствии гуминовой кислоты. Наиболее ярко это проявляется на 5 сутки в световом варианте опыта (Рисунок 68).

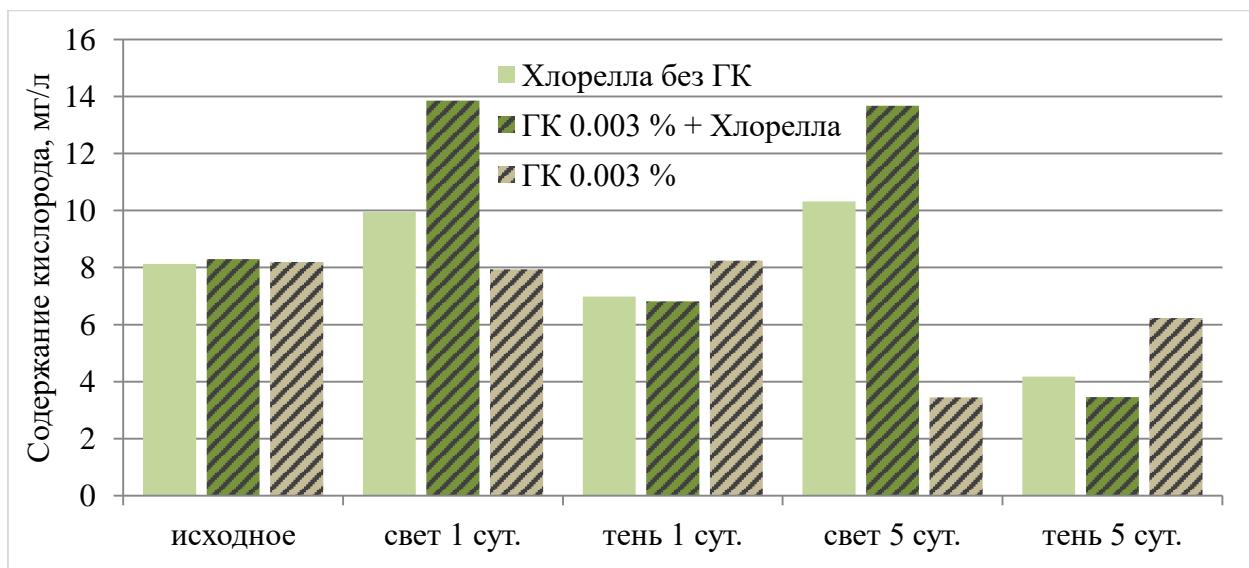


Рисунок 68 – Содержание кислорода (мг/л) в разных вариантах и на разных стадиях опыта

По результатам измерения оптической плотности (Рисунок 69) только суспензии водоросли отмечено увеличение этого показателя на свету, что, скорее всего, связано с увеличением содержания хлорофилла, правда, изменения достаточно незначительные. Максимальные изменения мы наблюдаем на свету для культуры водоросли в присутствии ГК, что подтверждает влияние препарата на живой организм, стимуляцию роста. В то же время отмечено, что оптическая плотность чистого препарата ГК, хоть и не значительно, сама по себе повышается со временем, при этом в тени и на свету различий не наблюдается. Изменения «смеси» в основном связано с изменением культуры водоросли, в то время как изменения плотности чистого препарата ГК на этом фоне незначительно.

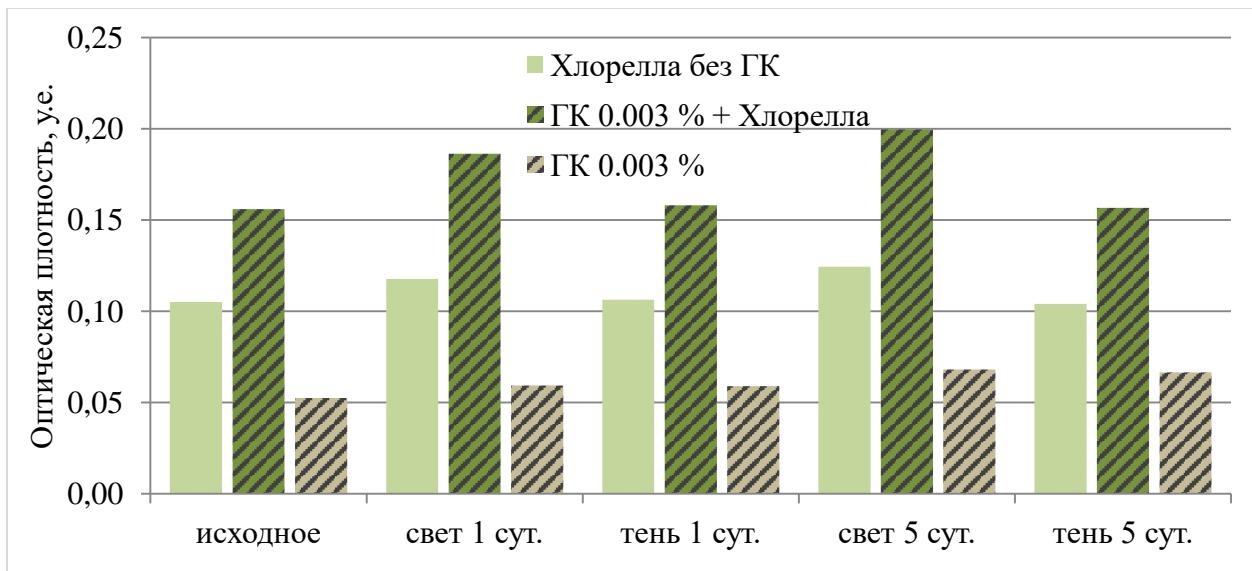
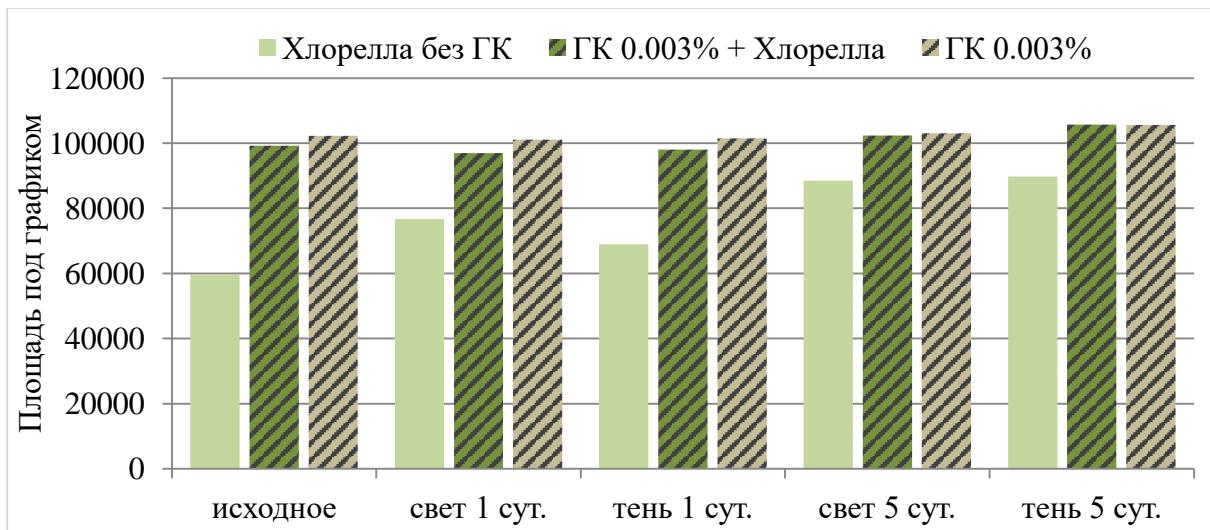
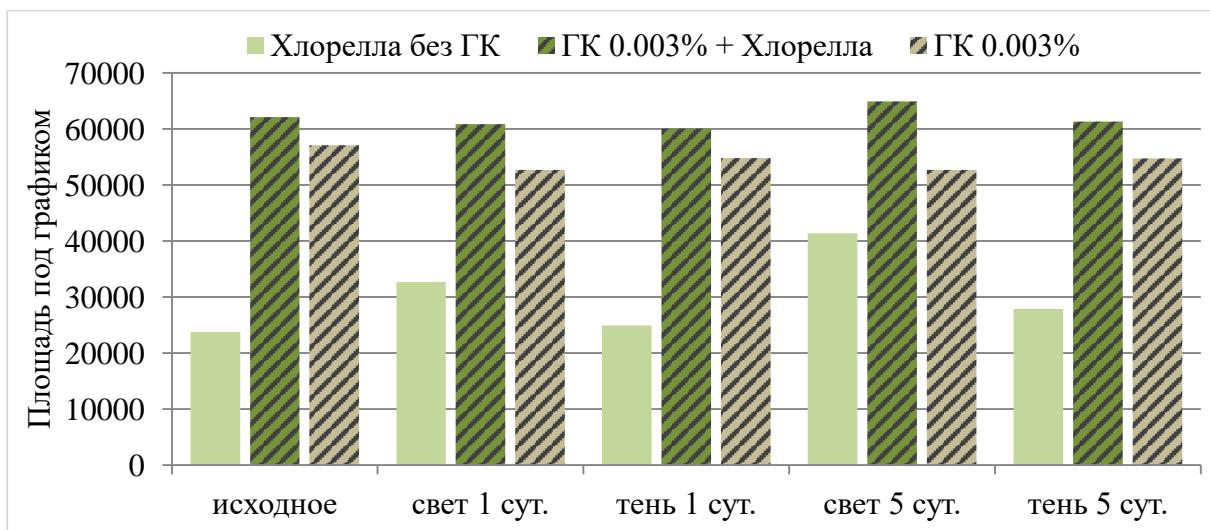


Рисунок 69 – Оптическая плотность в разных вариантах и на разных стадиях опыта

По спектрам флуоресценции мы не видим существенных изменений сигнала для растворов только препарата ГК во всех вариантах опыта. Максимальные различия наблюдаем для чистой культуры водоросли. Для сравнения флуоресценции разных вариантов опыта нами была вычислена площадь под полученными графиками (Рисунок 67), которую мы называем «интегральной флуоресценцией». На свету культура водоросли демонстрирует увеличение интегральной флуоресценции, зависящее от длительности опыта (Рисунок 70). В темноте также заметно увеличение интегральной флуоресценции, что говорит о жизнеспособности и росте водоросли, которое лимитируется отсутствием света. В целом, для длины возбуждения 420 нм указанные зависимости заметны хуже (Рисунок 70В). Интересно, что для длины волны возбуждения 270 нм сигнал от раствора гуминовой кислоты всегда больше, чем от суспензии хлореллы с ГК, т.е. сигнал от смеси компонентов не является суммой сигналов отдельных частей (Рисунок 70А). С этой точки зрения использование длины волны возбуждения 270 нм более предпочтительно, т.к. сигнал от смеси компонентов превышает сигналы каждого из компонентов.



A



B

Рисунок 70 – Интегральная флуоресценция для различных вариантов опыта для длины волны возбуждения 270 нм (A) и 420 нм (B)

На основе полученных данных можно предположить, что ГК влияет на водоросль посредством изменения окружающей среды (в первую очередь через содержание кислорода). Это подтверждается тем, что наблюдается изменение количества клеток водоросли и их размеров (Рисунки 71 - 72), отмечается увеличение кислорода на свету, но при этом нет явных изменений, происходящих на фотосинтетическом аппарате, которые можно оценить за счет изменения интенсивности флуоресценции/интегральной флуоресценции (ИФ).

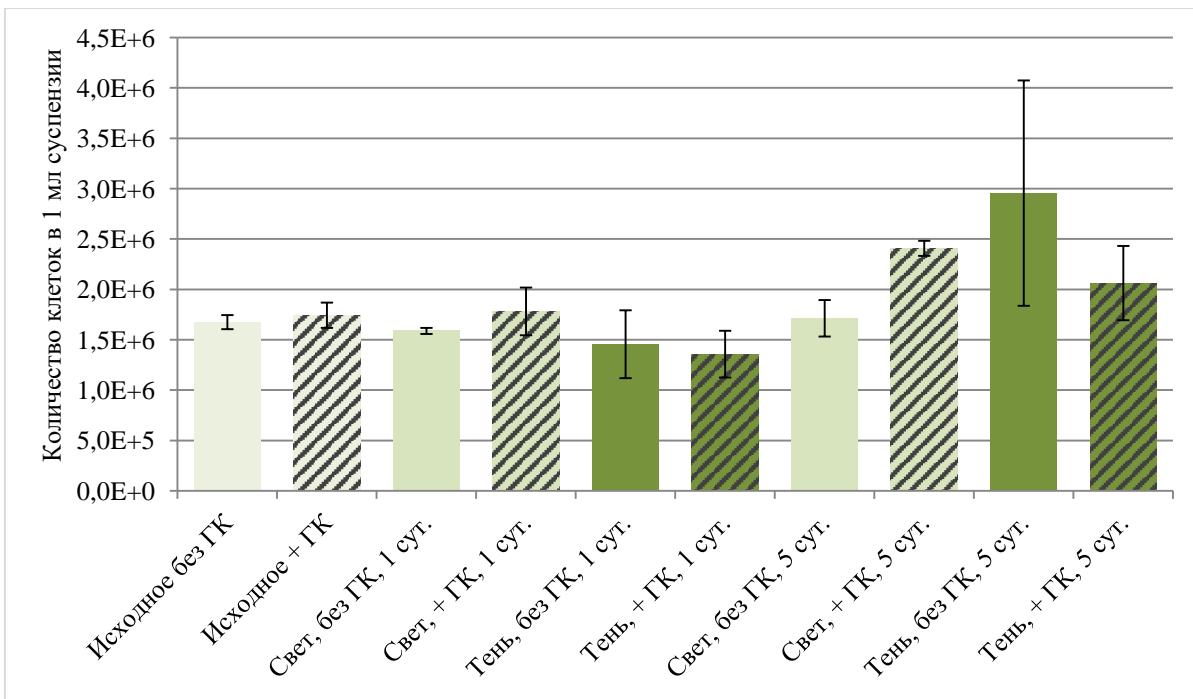


Рисунок 71 – Количество клеток водоросли в разных вариантах и на разных стадиях опыта

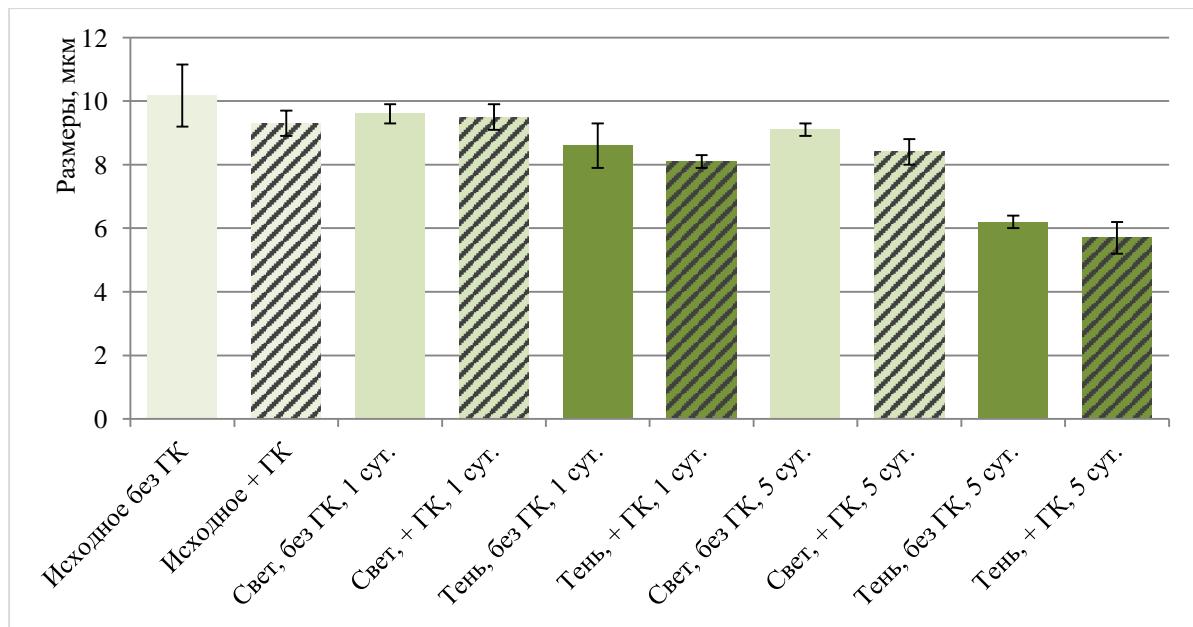


Рисунок 72 – Размеры клеток водоросли в разных вариантах и на разных стадиях опыта

Высокое содержание кислорода в среде может негативно сказываться на культуру водоросли. Это косвенно подтверждается увеличением интенсивности флуоресценции, которая зависит не только от общего содержания пигментов в водоросли, но и стресса живого организма. Так мы наблюдаем максимальные уровни кислорода на 5 сутки на светы, в этих же вариантах опыта флуоресценция достигает максимальных значений. В присутствии ГК вообще не отмечено существенных изменений интенсивности

интегральной флуоресценции. Нами отмечено, что присутствие ГК приводит к связыванию «избыточного» кислорода, что стабилизирует условия роста водоросли, в свою очередь, отражающееся на результатах флуоресценции. Нельзя не отметить, что ГК окрашивают среду в темные тона (поглощают возбуждающее излучение и гасят сигнал флуоресценции), обладают собственными спектрами флуоресценции (т.е. флуоресценция, вызванная хлореллой, может привести ко вторичной флуоресценции ГК). Таким образом, спектры флуоресценции в системе хлорелла – ГК формируются за счет наложения разнообразных сигналов. Нами показано, что интегральная интенсивность флуоресценции не изменяется существенно со временем для раствора ГК, при этом, для опыта с хлореллой в присутствии ГК интегральная флуоресценция также изменяется незначительно.

Это связано в первую очередь с тем, что ГК связывают «избыточный» кислород в замкнутой системе, который негативно сказывается на росте и развитии водоросли.

При изучении размера клеток водоросли было отмечено, что добавление раствора ГК приводит к наблюдаемому уменьшению диаметра клеток. Средний минимальный размер клеток был обнаружен на 5 сутки в темновых вариантах опыта как с присутствием, так и отсутствием ГК. В этих же вариантах отмечено максимальное количество клеток, что указывает на размножение культуры водоросли.

Проведенные эксперименты показали, что влияние ГК на зеленую водоросль во многом связано с изменением ими окружающей среды. В первую очередь ГК не позволяют концентрации растворенного в среде кислорода достигать высоких значений, который могут быть токсичны для живого организма. Во вторую, хоть и незначительно (в концентрации, использованной для постановки эксперимента), но ограничивают количество света, которое попадает на клетки водоросли.

Препарат ГК серой пахотной почвы обладает АОА, уменьшая стресс от «избыточного» кислорода.

Наибольшие изменения, происходящие как с водорослью, так и с препаратом ГК связаны со световыми вариантами опыта, что говорит о фотоиндуцируемой природе наблюдаемых явлений. Ярко проявляется убыль в содержании кислорода в опыте с ГК на 5 сутки.

В опыте с водорослью наибольшее количество кислорода выделяется на свету в 1 и 5 сутки в присутствии препарата ГК, который снижает возможный окислительный стресс на водоросль. Это же подтверждается наибольшим приростом количества клеток водоросли на 5 сутки на свету.

В присутствии ГК, видимые в микроскоп размеры клеток водоросли меньше, чем в вариантах без ГК даже в самом начале закладки опыта, что, скорее всего, связано с осмотическим эффектом действия ГК.

В присутствии препарата ГК заметно небольшое увеличение интенсивности интегральной флуоресценции в опыте с *Chlorella vulgaris*, но существенно меньшее, чем для вариант опыта только с водорослью. При этом изменения спектров флуоресценции самой ГК тоже не установлены. Это опять же подтверждает стабилизирующую роль ГК в среде.

9 Разработка методов оценки состояния здоровья экосистем по функциональному состоянию животных-биондикаторов

Глобальные изменения климата и повсеместно наблюдаемые в настоящее время резкие изменения погоды будут влиять и уже влияют на состояние экосистем и географические ареалы видов [297-299]. Климатические изменения в сочетании с современным уровнем антропогенной нагрузки приводят к повышению температуры воды и снижению уровня кислорода в водных экосистемах мира, что негативно сказывается на качестве воды и биоразнообразии. Современный уровень такого воздействия на морскую среду требует разработки новых подходов к водопользованию и охране окружающей среды. Особенно это актуально для Балтийского моря и его восточной части - Финского залива, который в значительной степени подвержен негативному воздействию человеческой деятельности. Сброс сточных вод с очистных сооружений, открытие нефтепаливных терминалов и строительство портов, а также интенсивное развитие судоходства в сочетании с эвтрофикацией представляют собой типичные угрозы для экосистем регионов Балтийского моря. Негативными последствиями такого воздействия являются снижение качества среды обитания и ухудшение физиологического состояния гидробионтов обитающих там. Медленная скорость обмена воды в Балтийском море делает экосистему Балтийского моря более уязвимой по сравнению с другими морскими районами. В Плане действий по Балтийскому морю Хельсинкской комиссии (ХЕЛКОМ) была подчеркнута необходимость разработки мониторинга биологических эффектов для обеспечения надежной оценки опасных веществ и разработки мер по смягчению неблагоприятных последствий человеческой деятельности для окружающей среды Балтийского моря. Раннее выявление неблагоприятных эффектов антропогенного воздействия на гидробионтов и путей трансформации водных экосистем в условиях климатических изменений является важным звеном в решении задач сохранения биоразнообразия и «здоровья» водных экосистем, и в конечном итоге глобального углеродного баланса.

9.1 О возможности использования пресноводных раков в тестировании экологического состояния акваторий солоноватых вод

Пресноводных и морских беспозвоночных широко используют в качестве живых “мониторов” состояния среды их обитания. Удобным объектом являются пресноводные десятиногие раки – биосенсоры, используемые в биоэлектронных системах мониторинга токсичности природных и биологически очищенных сточных вод [300,301]. Эти системы позволяют непрерывно, в течение многих месяцев по характеристикам кардиоактивности раков, используемых в качестве биомаркеров, следить за функциональным состоянием животных в условиях свободного поведения. Непрерывный неинвазивный мониторинг сердечной деятельности пресноводных раков позволяет зарегистрировать по реакции кардиосистемы раков внезапные изменения качества воды. Изменения качества воды могут быть вызваны загрязнением как техногенного, так и природного происхождения, например, токсичными метаболитами во время цветения водорослей в летний период. Известно, что узкопалые раки *Astacus leptodactylus* Esch. обладают довольно высокими адаптивными способностями [302,303]. Было показано, что как ювенильные так и взрослые особи узкопалых раков способны выживать в солености, по крайней мере, до 21% в течение 9 недель, а в среде соленостью 7 % из икры раков вылупилась молодь в стадии развития 1, которая в последствии успешно перелиняла. Это обстоятельство позволяет авторам делать предположение о принципиальной возможности колонизации узкопальми раками, при необходимости, солоноватых вод [304]. Раки *Pontastacus (Astacus) leptodactylus* Esch. – аборигены для многих водных объектов России и способны обитать как в пресных водах, так и при повышенной солёности в прибрежных водах Чёрного и Каспийского морей адаптируясь к обитанию даже при солёности в 14% [305,306]. Однако к настоящему времени в литературе отсутствуют данные о кардиоактивности речных раков как интегральной меры их функционального состояния при длительном нахождении животных в воде с повышенной соленостью.

Исходя из этого, целью исследования было выяснение принципиальной возможности использования раков *Pontastacus leptodactylus* в качестве биоиндикаторов в биоэлектронных системах мониторинга качества воды применительно к солоноватым водам Финского Залива. Для этого в настоящем исследовании мы изучали по хронотропному показателю кардиоактивности частоте сердечных сокращений (ЧСС) физиологическое состояние раков *P. leptodactylus*, находящихся длительное время в среде повышенной солености, и предприняли попытку оценить возможные реакции сердечно-сосудистой системы раков, позволяющие животным компенсировать небольшие изменения солёности воды.

Эксперименты проводились на 14 половозрелых раках-самцах *Pontastacus leptodactylus* из пресноводных водоёмов, не имевших признаков заболеваний, с весом $32,1 \pm 2,1$ г и с длиной общей и карапакса соответственно $102,3 \pm 3,3$ мм и $51,8 \pm 1,2$ мм. Об удовлетворительном функциональном состоянии животных до опыта, в течение месяца адаптированных к лабораторным условиям, судили по их подвижности, поедании корма и хорошо выраженной защитно-оборонительной реакции – поднятию клешневых конечностей при хэндинге. Перед началом экспериментов каждого рака маркировали, на его карапакс над областью сердца приклеивали миниатюрный держатель для крепления волоконно-оптического датчика, соединённого с фотоплазмографом (Рисунок 73).



Рисунок 73 – Рак с оптоволоконным датчиком в аквариуме

Раков отсаживали в отдельные непрозрачные (для минимизации стресса) аквариумы размером $40 \times 35 \times 19,5$ см³, заполненные до уровня 8–10 см проточной, циркулирующей, дехлорированной водой, что обеспечивалось установкой замкнутого водоснабжения. Животных кормили раз в три дня личинками *Chironomus spp.* из расчета 2% массы тела на суточный рацион. На следующий после кормления день осуществляли частичную (30%) смену воды для ее очистки от продуктов метаболизма рака. Температура воды была 20°C, режим освещенности – 12 ч свет: 12 ч темнота. Длина волоконно-оптического кабеля позволяла животному свободно передвигаться по аквариуму и заходить в убежище. Система регистрации позволяла записывать и анализировать ЧСС одновременно у 7 раков в одинаковых условиях. Кардиоактивность раков непрерывно регистрировали в течение всего эксперимента, используя способ неинвазивной регистрации и последующего анализа ЧСС в режиме реального времени [301].

В настоящем эксперименте устанавливали два ряда аквариумов: верхний ряд – с раками в контрольной (отстоянной водопроводной) воде и нижний – с опытными раками, куда после 10 сут наблюдения через резервную емкость подавали раствор соли (NaCl) из расчета 6,5 г на 1000 мл. Соленость среды в аквариумах контролировали рефрактометром

RSA0100A Salinity/SG Refractometer (TransInstrument, Singapore), расчетный уровень 6.5‰ достигался за 2–3 минуты. Каждые трое суток 1/3 объема воды в аквариуме заменяли на свежую с добавлением расчетного количества соли для поддержания постоянной солености в 6,5‰. Эксперимент прекратили после того, как все животные успешно перелиняли. Поскольку имеются данные, что осмоляльность гемолимфы для некоторых видов раков остается постоянной по мере увеличения солености от 0 до 10‰ [307], в настоящем исследовании осмоляльность не измеряли.

Данные о частоте сердечных сокращений оценивали с помощью программного обеспечения Statistica v. 6 для Windows. Чтобы выявить первичный эффект воздействия повышения солености на сердечную деятельность, ЧСС, зарегистрированную в течение 15 мин до воздействия, сравнивали с ЧСС, зарегистрированной в течение 15 мин после воздействия, используя парный t-критерий для зависимых величин. Для оценки эффекта по сравнению с контрольной группой раков применяли t-критерий для независимых переменных, предварительно проверяя нормальность распределения по критерию Колмогорова-Смирнова. Изменения ЧСС считали значимыми при $p < 0.05$.

Через трое суток после помещения раков в экспериментальную установку у них установился суточный ритм кардиоактивности с более высокими значениями ЧСС в темное время суток (ЧССн) по сравнению с ЧСС в светлое время суток (ЧССП). После этого проводили эксперимент. Быстрое увеличение солености воды от 0 до 6.5‰ вызывает “аларм” реакцию раков (ЧССр), выражющуюся в кратковременном (15–20 мин) повышении ЧССП на 30% (Рисунок 74).

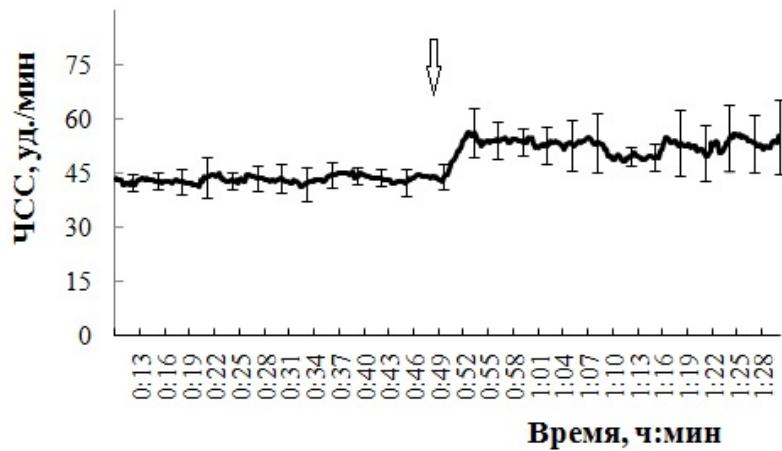


Рисунок 74 – Динамика ЧСС раков при изменении солености воды до 6.5‰. Стрелкой указано время подачи соли. Вертикальные линии – стандартное отклонение ($n=7$)

На типичной динамике ЧСС раков в течение 6-ти суток непрерывной регистрации, представленной на Рисунке 75 отчетливо видна суточная периодичность (циркадность) ритма ЧСС раков, как в пресной, так и в солоноватой воде.

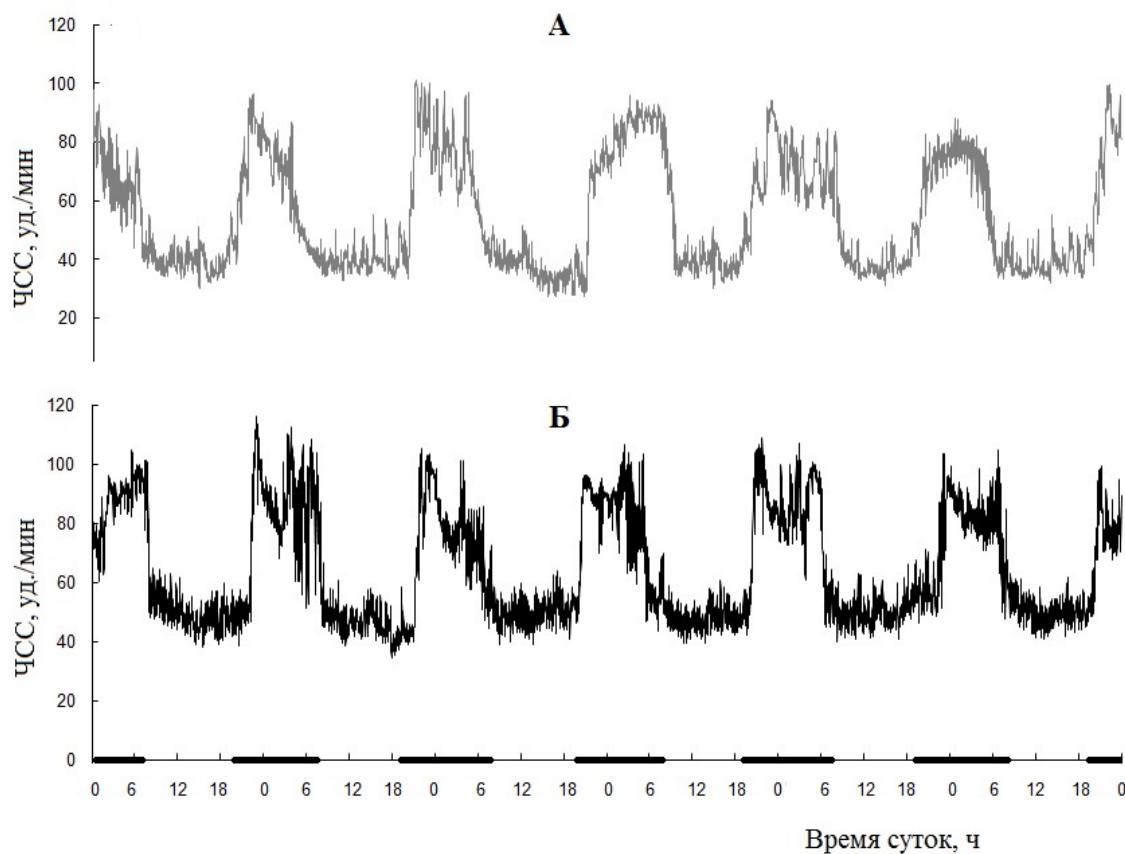


Рисунок 76 – Примеры типичной динамики ЧСС в течение 6-ти суток непрерывной регистрации. А – ЧСС рака № 1 в контрольной среде, Б - ЧСС рака № 2 в воде с соленостью 6,5‰. Черные участки временной шкалы показывают длительность темного периода.

Циркадность ритма задается режимом искусственного освещения (с 8:00 до 20:00 – освещение в 300 лк, с 20:00 до 8:00 – темнота). Суточный ритм кардиоактивности имеет следующие характеристики: период -24 часа, длительность ночной активности более 8 часов, частота сердечных сокращений ночной активности (ЧССн) в диапазоне 80-110 уд/мин, и ЧСС покоя (ЧССп) в дневное время в диапазоне 40-60 уд/мин. Этот ритм наблюдался у всех раков, как в контрольной, так и в соленой воде в течение 3-4 недель.

На Рисунке 77 показаны ЧССп и ЧССн раков в соленой и контрольной воде, полученные, начиная с пятых суток после помещения животных в экспериментальную установку.

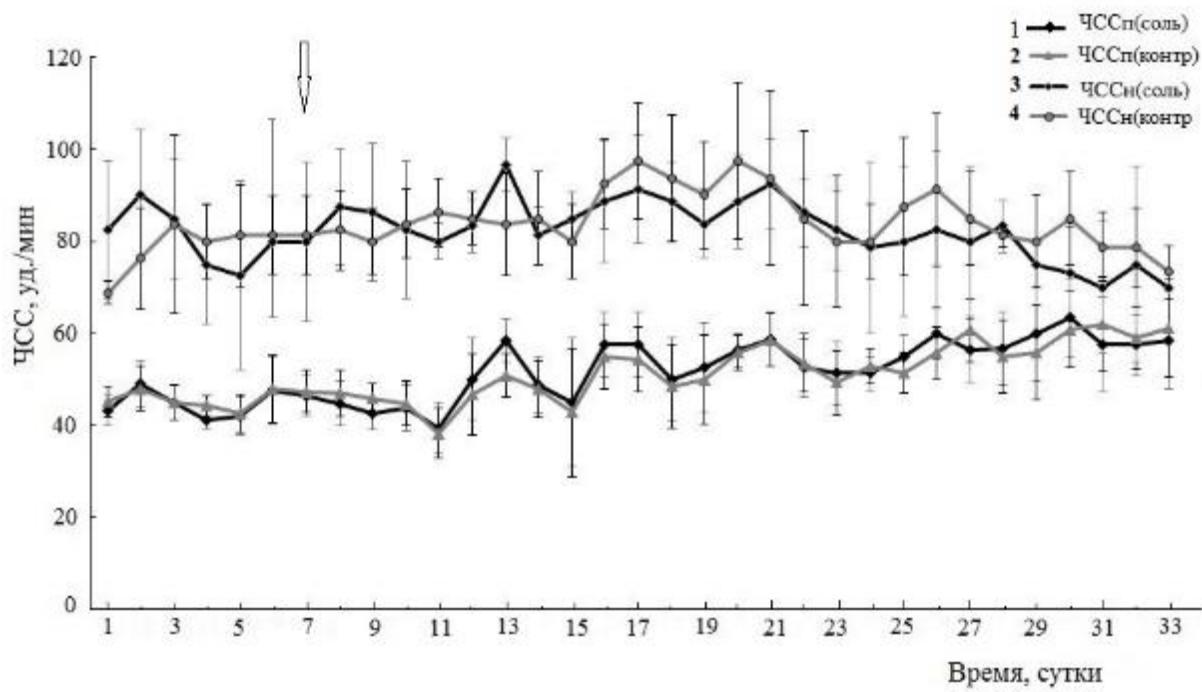


Рисунок 77 – ЧСС раков в соленой и пресной (контрольной) воде в течение эксперимента.
1 – ЧССп (соль), 2 – ЧССп (контроль), 3 – ЧССн (соль), 4 – ЧССн (контроль). Стрелкой
указано время подачи соли.

За несколько суток до линьки (5–7 сут в зависимости от конкретной особи) наблюдали постепенные односторонние изменения ритма и у экспериментальных, и у контрольных животных. Эти изменения заключались в неуклонном повышении ЧССп в дневное время и некотором снижении ЧСС в темное время суток, однако циркадный характер ритма кардиоактивности сохранялся, как и реакция на включение света. За двое-трое суток, предшествующих линьке (сбросу старого карапакса), циркадный ритм не наблюдался. Ночные и дневные ЧСС становились сходными по значениям за счет постепенного повышения дневной ЧСС и некоторого снижения ЧСС ночной активности. Типичный паттерн ЧСС в течение трех суток, непосредственно предшествующих линьке, для контрольной и экспериментальной групп раков показан на Рисунке 78.

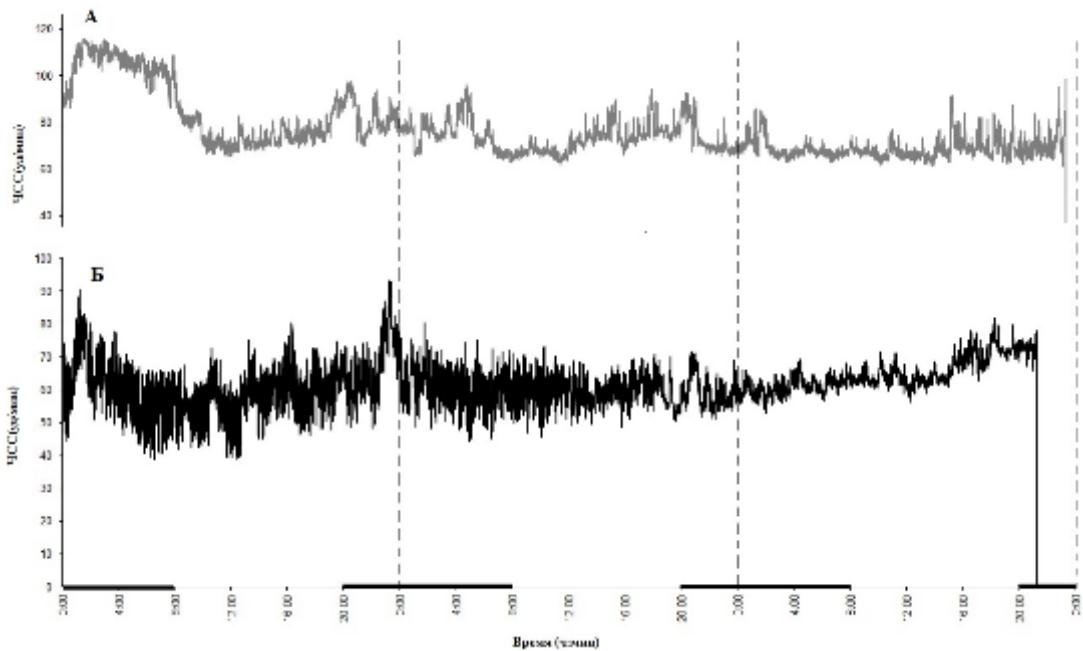


Рисунок 78 – Примеры типичной динамики ЧСС в конце предлиночной стадии (запись в течение 3 сут непосредственно перед линькой): А – ЧСС рака № 1 в контрольной среде, Б – ЧСС рака № 2 в соленой воде. Черные участки на оси абсцисс – длительность темного периода, пунктирные вертикальные линии – суточные интервалы.

Амплитуда и интенсивность флюктуаций значений ЧСС были более выражены у раков в соленой воде (Рисунок 78Б). В сутки сброса карапакса ритм и реакция на включение или выключение света, а также периодичность колебаний отсутствовали (вторая пунктирная вертикальная линия на Рисунке 78).

Из представленных результатов эксперимента следует, что кардиоактивность раков существенно не изменяется при длительном (30-40 дней) содержании в воде с соленостью 6.5 %. Однако, следует отметить, что у раков в соленой воде повышалась интенсивность небольших по амплитуде периодических флюктуаций ЧССп (Рисунки 76 и 78), при этом среднее значение ЧСС сохранялось. Проведенный частотный анализ значений ЧССп показал, что на кривых дневной динамики ЧСС для раков, экспонировавшихся в соленой воде, интенсивность периодических колебаний сердечного ритма длительностью от шести до трех мин с максимумом ~4.8 мин. значительно превышает контроль. На Рисунке 79. приведены примеры типичных периодограмм ритма ЧССп в контроле и в соленой воде.

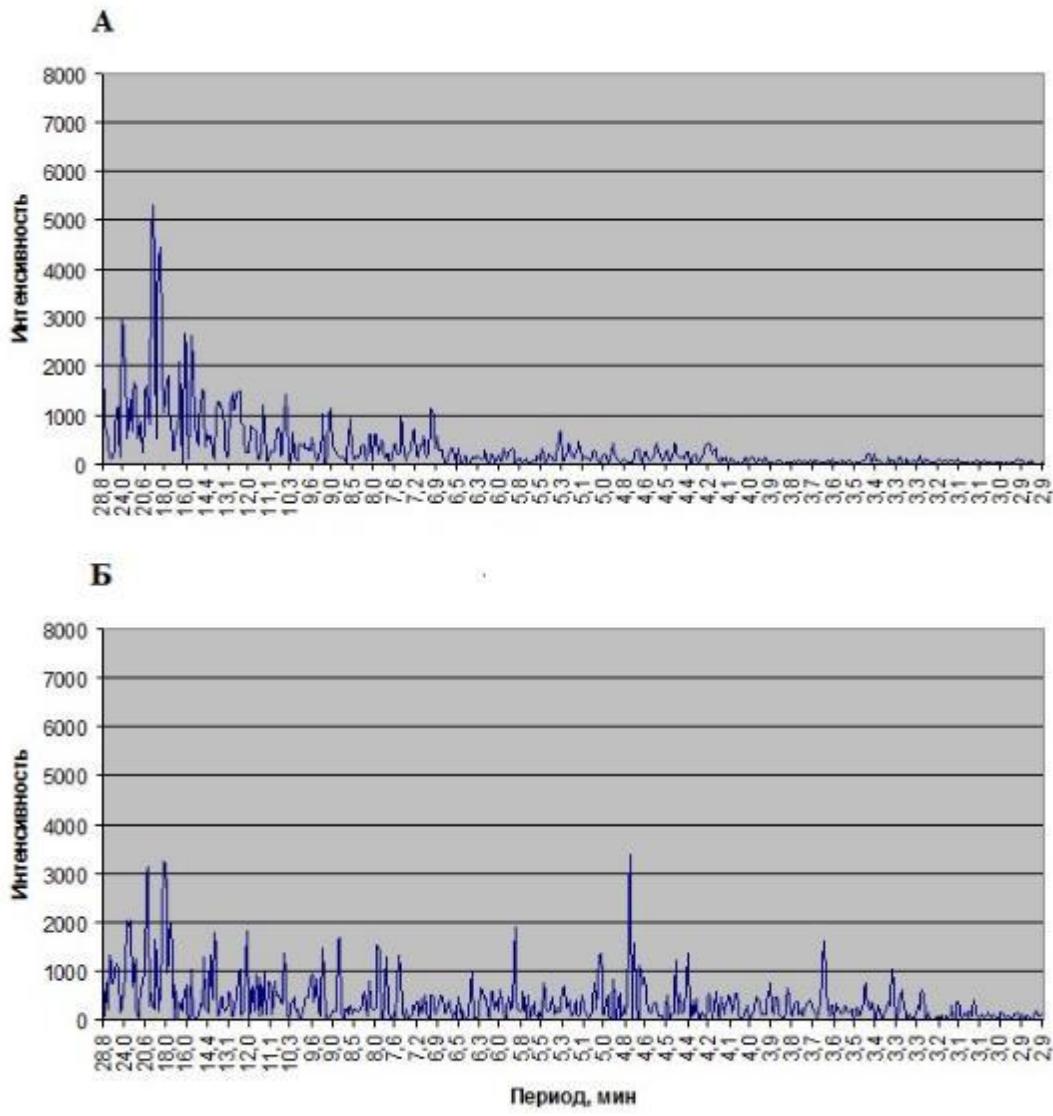


Рисунок 79 – Пример типичных периодограмм: А – частотный спектр ЧССП рака № 1 в контрольной среде , Б - частотный спектр ЧССП рака № 2 в воде с соленостью 6,5%. По оси ординат интенсивность встречаемости в относительных единицах, по оси абсцисс период в минутах.

Рассчитанный на основе полученных периодограмм коэффициент удельного веса кратковременных колебаний ЧССП (отношение интенсивности колебаний с периодом от двух до 10 мин к интенсивности всех флюктуаций) за двое суток до и после подачи соли, а также спустя 15 сут экспозиции показал достоверное (t -критерий, $p < 0.05$) увеличение удельного веса таких колебаний в соленой воде: 0.21 ± 0.03 ; 0.32 ± 0.07 ; 0.30 ± 0.05 соответственно.

В течение эксперимента все раки выжили и успешно перелиняли.

Пороги толерантности пресноводных раков при изменении солености среды, при всей актуальности тематики [308], к настоящему времени изучены недостаточно [307,309]. Кроме того, остается вопрос: могут ли пресноводные тест-организмы быть использованы для тестирования биологических эффектов поллютантов в солоноводных акваториях Балтики с соленостью, например, до 10–12‰. Установлено, что это возможно при предварительной акклиматации инфузорий к соленой воде (12‰) в течение 10 сут, выявлены четкие реакции инфузорий на присутствие в соленой воде токсичных для них ионов меди [310]. Ранее было показано [309], что *A. leptodactylus* способен к гиперрегуляции при солености 10‰ в течение 96 ч. В физиологические механизмы адаптации к повышению солености среды у раков вовлечены эпителиальные клетки жабр, желудочно-кишечного тракта, другие органы и ткани [302,304]. Полученные нами результаты свидетельствуют, что пресноводные раки *P. leptodactylus* реагируют на быстрое изменение солености воды от 0 до 6.5‰ “аларм” реакцией, выражющейся в кратковременном (15–20 мин) повышении ЧСС на 30%. Такой ответ сердечно-сосудистой системы раков – характерная первичная реакция организма на стрессовый фактор. Именно этот тип реакции сердечно-сосудистой системы положен в основу принципа биоэлектронного метода оценки качества водной среды по показателям кардиоактивности раков и моллюсков [301]. В соленой воде раки сохраняют хемосенсорную реакцию на изменение кислотности среды, что отражается на их кардиоактивности [311]. Наблюдающийся циркадный ритм ЧСС у раков и в контрольной, и в соленой воде связан с особенностью поведения раков как животных, активных в сумеречное время. Четкое проявление циркадианной ритмики ЧСС является показателем хорошего (здорового) функционального состояния раков в межлиночный период [312-314]. Характерные изменения паттерна кардиоритма узкопалых раков на предлиночной стадии типичны для высших раков и связаны с физиологической подготовкой к сбросу старого панциря. Аналогичные изменения ритма отмечены нами ранее для раков *Cherax quadricarinatus (von Martens)* [314]. Наблюдаемое в настоящей работе в соленой воде некоторое увеличение флюктуаций среднего значения ЧССп в дневное время, имеющих вид кратковременных амплитудных колебаний длительностью ~5 мин, возможно, свидетельствует о включении дополнительных физиологических (предположительно, висцеро-кардиальных) механизмов поддержания осмоляльности гемолимфы, что требует дополнительных энергетических затрат. Выживаемость раков (100%) и их успешная линька также указывают на удовлетворительное функциональное состояние животных, которое принципиально не изменилось в ходе эксперимента с воздействием на них солоноватой воды.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что пресноводные раки

P. leptodactylus могут значительное время переживать в среде с повышенной соленостью в 6.5%, не изменяя своего физиологического статуса, фиксируемого по показателям кардиоактивности, неинвазивно регистрируемой в процессе эксперимента. Таким образом, они могут успешно использоваться в биоэлектронных системах мониторинга кардиоритма как интегрального показателя их здоровья и индикативного показателя стресса животного, в качестве биосенсоров в солоноватых водах на протяжении, по крайней мере, двух месяцев.

9.2 Методический подход к экспериментальной оценке функционального состояния («здоровья») пресноводных раков по максимальной скорости потребления кислорода

Диагностика физиологического состояния биоиндикаторных организмов, обитающих в экосистемах, часто используется для оценки воздействия опасных химических веществ и является одним из принципов биологического мониторинга среды. Изменение скорости аэробного метаболизма, обычно оцениваемое по скорости потребления кислорода, является проявлением одного из наиболее общих физиологических ответов на стресс, вызванный вредными загрязнителями среды обитания [315,316]. Гидробионты, длительное время обитающие в неблагоприятных или загрязненных условиях, требующих от организма дополнительных энергетических затрат на поддержание гомеостаза, имеют более низкий статус функционального состояния (здравья) по сравнению с аналогичными организмами, обитающими в условно незагрязненных районах. Поэтому интенсивность аэробного метаболизма гидробионтов может служить интегральным показателем качества водной среды. Подход, заключающийся в измерении потребления кислорода при максимальной нагрузке, в мире широко используется для оценки функциональных возможностей кардиореспираторной системы животных и человека [317]. Максимальная скорость потребления кислорода обычно устанавливает верхний предел интенсивности работы, которую животное может выдержать без усталости и является критерием аэробной мощности. Для людей Американская кардиологическая ассоциация опубликовала заявление с рекомендацией регулярно оценивать кардиореспираторную пригодность (cardiorespiratory fitness — CRF), количественно измеряемую как скорость потребления кислорода при максимальной нагрузке, использовать в качестве клинического показателя жизнедеятельности [318]. Пресноводные высшие раки часто используются в качестве индикаторных организмов устойчивого функционирования водной экосистемы, в которой они обитают, и в биоэлектронных системах мониторинга качества воды [300-301,314,319].

Диагностику функционального состояния рака предлагается проводить путем одновременной неинвазивной регистрации хронотропной характеристики

кардиоактивности – ЧСС, измеряемой оригинальным волоконно-оптическим методом [301] и скорости потребления кислорода измеряемой полярографическим методом.

Для оценки функционального состояния раков по аэробной мощности, которая характеризует состояние кардиореспираторной системы, применяется функциональная нагрузка «подвес». Процедура такого тестирования проводится следующим образом: непосредственно за оптическое волокно рак подвешивается в воде выше дна на несколько сантиметров (Рисунок 80А).



А



В

Рисунок 80 – А - Функциональная нагрузка – «подвес», В – респирометр с полярографическим электродом

Похожий прием применяется для оценки максимальных значений аэробного энергообмена крабов *Carcinus maenas* [320].

Измерение максимальной скорости потребления кислорода, являющейся критерием аэробной мощности, можно проводить на всех видах пресноводных раков. Для этого на карапакс животного над областью сердца приклеивается миниатюрный держатель для крепления волоконно-оптического датчика, соединённого с фотоплетизмографом для измерения ЧСС (Рисунок 81).



А



В

Рисунок 81 – Рак вида А - *Astacus leptodactylus*, Б - *Cherax quadricarinatus* с оптоволоконным датчиком.

Раков содержат в лаборатории в климатических аквариальных. Перед началом исследования определяют вес животного и размер. Для измерения максимальной скорости потребления кислорода рака помещают в непроточный респирометр. В качестве такового можно использовать прозрачные стеклянные контейнеры объемом 300 мл с пластиковыми крышками (Рисунок 81В). Рак с наклеенным держателями помещается в контейнер. Далее через отверстие в крышке в держатель, вставляется полярографический электрод, и оптоволоконный зонд, за волокно которого рак приподнимается над дном контейнера и сосуд заполняется аэрированной водой (насыщение кислородом не менее 90%) без пузырей и герметично закрывается крышкой. Далее начинают одновременную регистрацию кардиоактивности и скорости потребления кислорода у рака.

Для регистрации сигнала кардиоактивности используются лазерные волоконно-оптические фотоплетизмографы. Для отведения оптического сигнала, содержащего информацию о кардиоактивности используется волоконно-оптический зонд. Суть неинвазивного метода регистрации сигнала кардиоактивности состоит в том, что по тонкому волоконно-оптическому волокну излучение инфракрасного полупроводникового лазера, расположенного в корпусе лазерного-волоконного оптического фотоплетизмографа, передается к карапаксу рака над областью расположения сердца. Отраженный от сокращающегося сердца свет, содержащий информацию о ритме сердечной деятельности, передается по второму волоконно-оптическому волокну на фотоприемник фотоплетизмографа. После соответствующего усиления, фильтрации и преобразования в цифровую форму сигнал в виде фотоплетизмограммы передается на компьютер для анализа кардиоактивности раков, где с помощью оригинальной программы рассчитывается среднее значение ЧСС. По фотоплетизмограммам определяют максимальную ЧСС раков и определяют скорость потребления кислорода моллюсками при максимальных значениях ЧСС полярографическим методом. Концентрацию кислорода в респирометре измеряют каждые 5 минут, длительность нахождения раков в респирометре составляет 30 минут. Измерение концентрации кислорода в воде респирометра осуществляется оксиметром с полярографическим электродом, например портативным оксиметром HI 9142 (Hanna Instruments) с автоматической температурной компенсацией и приведенной погрешностью измерения $\pm 2,5\%$. Перемешивание воды не требуется, так как вода перемешивается за счет интенсивной двигательной активности рака, пытающегося клешнями достать дно респирометра. Отдельно в контрольной серии экспериментов определяют изменение содержания кислорода в воде респирометра без рака.

9.3 Оценка длительного воздействия биологически очищенных сточных вод на ракообразных: Возможность раннего выявления опасной токсичности очищенных сточных вод с помощью биоэлектронной системы непрерывного анализа кардиоактивности раков

В современных условиях мощного антропогенного давления на окружающую среду на фоне глобальных изменений климата актуальное значение приобрела проблема сохранения водных экосистем континентальных водоемов, поскольку они наиболее подвержены интенсивному негативному воздействию как стоков промышленного производства и сельского хозяйства, так и бытовых. Негативная трансформация водных экосистем может привести к дисбалансу в углеродном цикле, поскольку основную функцию в выводе CO₂ из атмосферы выполняют океанические гидробионты. На органическое вещество приходится 67,8 % всего закрепляемого углерода [321].

В соответствии с официальными нормативами все существующие технологии очистки сточных вод не позволяют полностью удалить многие токсичные и стойкие химические соединения, способные к биоаккумуляции, особенно в низких концентрациях, такие как тяжелые металлы, микропластик, фармакологические вещества. Так, в настоящее время присутствие фармацевтических препаратов обнаружено в водоемах по всему миру [322,323]. Показано, что фармпрепараты в экологически значимых концентрациях токсичны для гидробионтов. Так, некоторые из них, например, психотропные вещества, влияют на поведение раков, а также на размножение и развитие дафний [324,325].

В связи с этим возникает проблема контроля качества воды, сбрасываемой в водоемы, и непрерывный мониторинг их состояния. Раннее выявление токсичности биологически очищенных сточных вод для гидробионтов является важным звеном в решении задач сохранения биоразнообразия и «здоровья» водных экосистем, и в конечном итоге глобального углеродного баланса.

Для решения этой задачи разработаны многочисленные методы аналитического определения содержания различных веществ в воде и ее физико-химических свойств, однако этими методами невозможно оценить совокупное влияние антропогенных загрязнителей на биоту водоема-приемника, только методы биоиндикации и биотестирования в состоянии справиться с этой задачей. Использование живых организмов в качестве биоиндикаторов и характеристик их функционального состояния в качестве биомаркеров позволяет оценивать биологические эффекты как идентифицированных, так и неизвестных веществ, в том числе и возможные синергические эффекты. В настоящее время биоконтроль токсичности сточных вод осуществляется как традиционными методами биотестирования: по подавлению роста некоторых видов водорослей, по снижению подвижности и/или выживаемости в лабораторных культурах дафний, по ингибирование

люминесценции у бактерий [326], так и предлагаются использовать различные системы раннего оповещения об ухудшении качества воды, определяемому по (биомаркерам), отражающим функциональные показатели состояния здоровья гидробионтов гидробионтов [327,328].

Поэтому целью настоящей работы было изучение функционального состояния пресноводных раков по вариабельности маркеров ЧСС в условиях длительного воздействия биологически очищенных сточных вод (БОСВ), с дополнительным независимым контролем с использованием дафний, являющихся традиционным объектом водной токсикологии.

Биоэлектронная система (Рисунок 82) установлена в конце технологического процесса биологической очистки после УФ обеззараживания непосредственно перед выпуском БОСВ в Невскую губу Финского залива. Параллельно аквариумам с раками также поставлен аквариум с рыбками для оценки качества воды по подвижности рыб. Вода, поступающая к ракам и рыбкам, также бралась и для биотестирования на дафниях с периодичностью 1 раз в 3 дня.

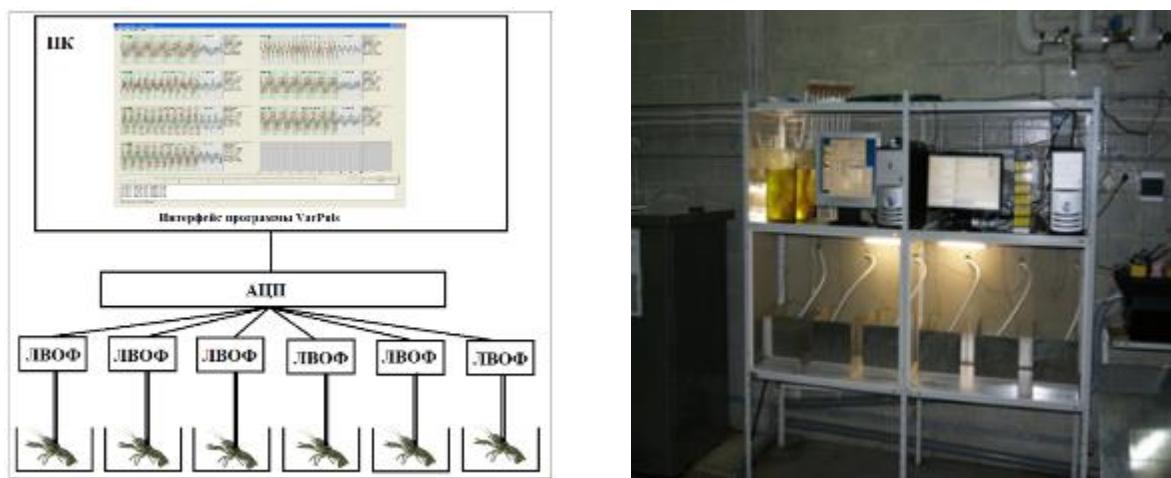


Рисунок 82 – А-Блок схема и В-общий вид биоэлектронной системы мониторинга качества воды, установленной на Юго-Западных очистных сооружениях «ГУП Водоканал» города Санкт- Петербурга. АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЛВОФ – лазерный волоконно-оптический фотоплетизмограф; ПК – персональный компьютер; VarPulse – оригинальная программа обработки кардиосигналов.

9.3.1 Оценка качества БОСВ по характеристикам кардиоактивности десятиногих раков

Узкопалых раков вида *Pontastacus leptodactylus*, приобретенных при коммерческом вылове, адаптировали к лабораторным условиям в течение 2-х недель. После акклиматации

каждому раку прикрепляли на карапакс над областью сердца опто-волоконный зонд для регистрации кардиосигнала [328] и помещали в отдельные экспериментальные аквариумы с циркулирующей отстоянной водопроводной водой лабораторной установки, по существу аналогичной системе, установленной на Юго-Западных очистных сооружений (ЮЗОС) «ГУП Водоканал» города Санкт- Петербурга. В течение недели проводили исследования кардиоактивности по отработанной методике: у раков непрерывно регистрировали кардиоактивность и записывали в виде фотоплетизмограмм. При математической обработке фотоплетизмограмм в реальном времени определяли ЧСС (уд/мин) с усреднением по 100 карионтервалам. При дальнейшей обработке определяли наличие циркадного ритма кардиоактивности и его амплитудные характеристики, а именно ЧСС в покое в светлое время и при спонтанной активности в темное время суток. Оригинальная программа математической обработки VarPulse позволяет, кроме выведения и архивации числовых данных, строить графики зависимости ЧСС от времени суток. В конце недели проводили тестирование для определения ЧСС при стрессе (вынужденной активности). Для этого раков за оптический зонд датчика извлекали из укрытия и удерживали за оптоволокно в воде на высоте 5 см над дном аквариума на 1-2 минуты, после чего отпускали. Определяли максимальное значение ЧСС за первые 10 мин с начала теста. Похожая процедура применялась для оценки максимального аэробного энергообмена *Carcinus maenas* [320]. Функциональное состояние раков оценивали по показателям суточной кардиоактивности в дневное и ночное время и определяли наличие суточного ритма, а также по ЧСС во время еженедельного тестирования.

Группу из 6 половозрелых раков-самцов без признаков заболеваний общей длиной $10,5 \pm 0,4$ см и длиной карапакса $5,3 \pm 0,2$ см находящихся в удовлетворительном функциональном состоянии (Таблица 36) поместили в такие же аквариумы на ЮЗОС. Кардиоактивность раков регистрировали непрерывно в течение месяца и определяли те же характеристики кардиоактивности, что и в лаборатории. При построении суточных графиков кардиоактивности и при вычислении средних значений ЧСС в дневное время не учитывались значения ЧСС во время кормления раков и чистки аквариумов. Хронический эффект нахождения животных-биоиндикаторов в БОСВ оценивали по динамике характеристик кардиоактивности, первоначально измеренных перед началом экспозиции. Режим кормления (раз в 3 дня) и освещенности ($12C/12T$) сохранялся неизменным в течение всего исследования. Полученные данные обрабатывали статистическими методами с применением парного t-критерия Стьюдента для зависимых выборок при оценке влияния исследуемых факторов на кардиоактивность каждого рака и двухвыборочного t-критерия

для независимых величин при сравнении независимых групп. Значимыми считали различия сравниваемых величин при $p < 0,05$.

9.3.2 Определение хронического токсического действия БОСВ на дафний

В течение того же месяца в лабораторных условиях проводилось биотестирование БОСВ, сбрасываемых ЮЗОС в Финский залив, на хроническую токсичность с использованием классического тест-объекта - дафний. Биотестирование проводилось по стандартизованной методике, допущенной для целей государственного экологического контроля [329]. Хроническое токсическое действие исследуемой воды на дафний (*Daphnia magna* Straus, *Cladocera, Crustacea*) определяется по смертности и изменению их плодовитости за период до 24 суток в исследуемой воде по сравнению с контрольным экспериментом, где используется вода, в которой культивируются дафнии. Критерием хронической токсичности служит гибель 20% и более и (или) достоверное отклонение в плодовитости из числа выживших тест-организмов по сравнению с контрольным экспериментом. Исследования проводились на лабораторной культуре *Daphnia magna* Strauss, которая культивируется в РЦ «Обсерватория экологической безопасности» в контролируемых условиях (температура 20-22 °C, освещенность 400-600 лк). В сосуды (объемом 250 мл) наливали по 200 мл контрольной воды и биологически очищенной сточной воды. В каждый сосуд вносили одинаковое количество корма, помещали по 7 дафний и содержали в лабораторных условиях при температуре 21±1°C в течение 24 дней. Повторность трехкратная. В качестве корма использовали хлебопекарные дрожжи и одноклеточные зеленые водоросли. Дафний кормили ежесуточно, 2 раза в неделю в сосудах с дафниями производили смену контрольной и исследуемой вод. При смене воды дафний кормили за 3 часа до смены. С момента появления молоди, каждый день производили подсчет выживших исходных самок и выметанной молоди. В те дни, когда меняли воду, самок с помощью стеклянной трубки пересаживали в заранее приготовленные сосуды с водой и подсчитывали их количество в каждом сосуде. Оставшуюся воду процеживали через сито из планктонного газа. При этом на сите оставалась выметанная молодь, которую подсчитывали и удаляли. Данная процедура позволяла контролировать правильность подсчета молоди. После того, как в контроле самки дали по 4 помета молоди, подсчет молоди заканчивали и эксперимент прекращали. Для определения хронической токсичности воды, водной вытяжки определяли процент погибших дафний в testeируемой воде по сравнению с контролем и среднее количество родившейся молоди на одну самку делением общего числа молоди, родившейся за 24 дня на количество выживших самок. Достоверность различий между показателями выживаемости и плодовитости дафний в

контроле и тестируемых растворах устанавливали по критерию Стьюдента для уровня значимости $P=0,05$ и степени свободы $n + (n - 2)$, где n - количество повторности.

В настоящее время показано, что изменения ЧСС ракообразных могут являться показателем их физиологического состояния [300,330]. Хронический эффект нахождения животных-бионикаторов в исследуемой воде оценивали по динамике характеристик кардиоактивности, первоначально измеренных перед началом экспозиции. Одним из основных критериев нормального функционального состояния рака является стойкое проявление циркадианного ритма кардиоактивности и адекватная реакция на предъявляемый стимул [328].

После адаптации раков к условиям лабораторного эксперимента (первые двое суток), они демонстрировали присущий десятиногим ракам (декапода) суточный ритм кардиоактивности с низкими значениями ЧСС покоя в дневное время и со значениями ЧСС в 1,5-2 раза большими во время ночной активности. Аналогичное повышение ЧСС в 2-2,5 по сравнению с ЧСС в состоянии покоя в дневное время раки демонстрировали и при тестировании. Данные кардиоактивности раков отобранных для использования в качестве тест-объектов в биоэлектронной системе мониторинга качества БОСВ представлены в Таблице 36.

Таблица 36. Показатели кардиоактивности *Pontastacus leptodactylus* в лаборатории
($T=18^{\circ}\text{C}$, освещенность 12C/12T, средние данные за 5 суток)

№ рака	ЧСС покоя (день) (уд/мин)	ЧСС активности (ночь) (уд/мин)	ЧСС стресса (при взятии в руки) (уд/мин)
1	40±3	85±9	113±5
2	38±2	80±8	91±7,5
3	39±4	80±7	99±10
4	40±2	95±10	108±11,5
5	36±3	75±8	101±10
6	39±2	80±7	97±9
*Показатели	35-45	$\geq 2\text{ЧСС}$ покоя	$> 2\text{ЧСС}$ покоя

* - Показатели удовлетворительного функционального состояния раков для формирования референтных групп бионикаторов [34].

В течение месяца при содержании раков в БОСВ не наблюдалось гибели раков. Температура воды колебалась в районе 18 °C (снижение от 19 °C в начале месяца до 17 °C в конце). После 3-х дневной адаптации к условиям ЮЗОС у раков стал проявляться циркадный ритм кардиоактивности, характеристики которого были аналогичны полученным в лаборатории у всех особей, которые были отобраны для эксперимента (Таблица 36), и такой суточный ритм сохранялся в течение всего периода наблюдения за раками в БОСВ. Показатели кардиоактивности раков в БОСВ на ЮЗОС представлены в Таблице 37.

Таблица 37 – Показатели кардиоактивности *Pontastacus leptodactylus* в БОСВ на ЮЗОС
(T=18±1°C, освещенность 12C/12T, средние данные за 31 сутки)

№ рака	ЧСС покоя (день) (уд/мин)	ЧСС активности (ночь) (уд/мин)	ЧСС стресса (при взятии в руки) (уд/мин)
1	41±2	85±8	115±5
2	39±2	80±9	90±3
3	38±4	82±7	98±4
4	40±3	98±10	110±5
5	37±4	75±6	100±4
6	40±2	83±7	96±5

Из данных таблиц 1 и 2 видно, что характер динамики суточной активности сохранился, а именно сохранилось соотношение средней ЧСС при спонтанной активности к ЧСС покоя равное 2. Наблюдающийся циркадный ритм ЧСС с низкими значениями ЧСС в дневное время и приблизительно в 2 раза большими значениями в ночное время у раков связан с особенностью поведения их как животных, активных в сумеречное время. Четкое проявление циркадной ритмики ЧСС является показателем хорошего (здорового) функционального состояния раков в межлиночный период [312,331].

При тестировании на ЮЗОС раки демонстрировали значения ЧСС, аналогичные значениям при тестировании в лаборатории. Типичный пример реакции кардиосистемы раков на кратковременный не повреждающий стимул заключается в быстром повышении ЧСС и восстановлении к исходному уровню в течение 30-40 минут с того момента, когда стимул прекращает действовать показан на Рисунок 83.

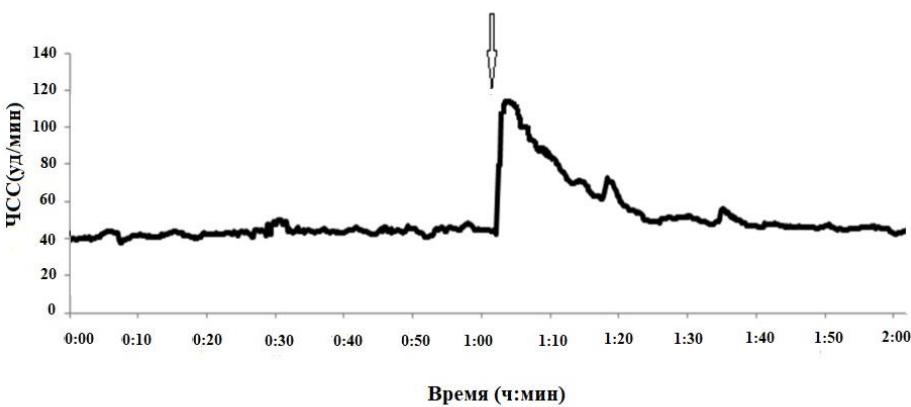


Рисунок 83 – Типичный пример реакции ЧСС раков на кратковременное, не повреждающее воздействие. Стрелкой показано время начала действия стимула

Таким образом, можно сказать, что функциональное состояние раков после экспозиции в БОСВ существенно не изменилось, поскольку не обнаружено достоверных различий ЧСС раков в покое, при спонтанной активности в ночное время и при стрессе измеренных до и в конце месячной экспозиции раков в БОСВ на ЮЗОС. Следовательно, БОСВ не оказали заметного хронического токсического воздействия на функциональное состояние животных, судя по показателям кардиоактивности, а также поведенческим реакциям (двигательная активность, питание). Исходя из полученных результатов, можно сделать предположение, что концентрация психотропных веществ в БОСВ ничтожна, поскольку в литературе есть сведения, что антидепрессанты и наркотические вещества влияют на поведение и кардиоактивность высших раков. Так у раков, подвергшихся воздействию метамфетамина в дозе 1 мкг/л в течение 21 дня наблюдалась более слабая реакция ЧСС на стресс [325].

Результаты длительного эксперимента по установлению хронического воздействия БОСВ на дафний наглядно представлены в Таблице 38.

Таблица 38. Результаты определения хронического токсического действия БОСВ на дафний

	Количество выживших дафний (шт)		Смертность дафний в опыте по отношению к контролю (%)	Плодовитость на одну самку	
	Контроль (шт)	БОСВ (шт)		Контроль (шт)	БОСВ (шт)
Сосуд №1	9	8	10	21,3	20,8

Сосуд №2	10	8	20	19,3	18,6
Сосуд №3	10	10	0	19,6	19,3
Среднее	9,7	8,7	10	20,1	19,4
СКО	0,6	0,9	10	1,1	1,4

Таким образом, исследование возможного хронического токсического действия БОСВ на гидробионтов методом биотестирования с использованием дафний не показало достоверных отличий выживаемости и плодовитости раков в БОСВ по сравнению с контролем, поэтому можно сделать заключение об отсутствии хронического токсического действия исследуемых вод на дафний.

Система биологической очистки сточных вод ЮЗОС, включающая в себя аэротенки с активным илом и отстойники, позволяют достичь достаточно высокой степени очистки (> 90%) для большинства из загрязняющих веществ, указанных в Таблице 39. В этой таблице приведены концентрации основных типов загрязнителей для сбрасываемой в Финский Залив БОСВ, качество очистки которой и контролирует биоэлектронная система.

Таблица 39. Усредненное качество очищенных сточных вод*

Наименование показателя	Концентрация	
	Выход	ПДК
Взвешенные вещества	5,2	
Сухой остаток	373,6	
БПКполн	7,5	
ХПК	32,9	
Фосфор общий	0,31	
Фосфор фосфатов	0,15	0,2
Азот общий	6,9	
Азот аммонийный	0,9	0,4
Азот нитратный	4,5	9,0
Фенол	0,00053	0,001
Нефтепродукты	0,061	0,05
СПАВ (анионные)	0,065	0,5
Железо	0,17	0,1
Цинк	0,034	0,01

Медь	0,0023	0,001
Марганец	0,17	0,01
Никель	0,0044	0,01

* - по данным «ГУП Водоканал» города Санкт- Петербурга.

Из таблицы следует, что превышение ПДК для воды водоемов рыбохозяйственного назначения наблюдается только для величины БПК и для некоторых эссенциальных металлов (в 2-3 раза по железу, меди и цинку и на порядок по марганцу). Поэтому тот факт, что используемые в качестве биосенсоров речные раки оказались способными сохранять хорошее функциональное состояние в воде такого состава в течение длительного времени, оказывается вполне объяснимым. Но особенность системы биологической очистки состоит в том, что в определенных условиях сохраняется возможность продуцирования новых и специфических токсинов при изменении условий процесса очистки. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии в БОСВ опасных токсических веществ, способных воздействовать на функциональное состояние гидробионтов.

При содержании в течение 30 суток предварительно протестированной группы раков *Pontastacus leptodactylus* в БОСВ, сбрасываемой в Финский Залив с ЮЗОС после завершения процесса ее биологической очистки, было установлено, что в этих условиях раки способны полностью сохранять такое же хорошее функциональное состояние, какое они демонстрировали и в чистой воде (без излишка нитратов, аммония, а также не полностью осажденных взвешенных частиц активного ила). Это следует из сохранения значений основных маркеров кардиоактивности раков. Одновременная экспериментальная оценка качества БОСВ на ЮЗОС ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» с помощью биоэлектронной системы непрерывного мониторинга качества воды с использованием узкопалых раков *Pontastacus leptodactylus* в качестве биоиндикаторов и стандартизованным методом биотестирования на дафниях *Daphnia magna Straus* не выявила существенного хронического токсического действия БОСВ на этих бентосных и планктонных ракообразных. Полученные результаты указывают на адекватность использования технологии биомониторинга на основе использования биоэлектронной системы для оценок биологических эффектов хронического воздействия БОСВ.

9.4 Оценка экологической безопасности обезвреженных озоном судовых балластных вод

На сегодняшний день биологические инвазии чужеродных видов в новые регионы являются одной из 4-х значимых угроз для всего мирового разнообразия, наряду с такими явлениями, как чрезмерная эксплуатация живых морских ресурсов; наземные источники

загрязнения морской среды; изменение или разрушение морских экосистем [40, 41]. В последние десятилетия отмечается значительное возрастание процесса проникновения видов вселенцев в экосистемы на фоне общих климатических и антропических изменений. ИЧВ являются одной из основных причин утраты биоразнообразия и изменения окружающей среды, а также серьезно влияют на экосистемные услуги и благополучие человека [332,333,334]. В большинстве случаев, инвазивные чужеродные виды быстро распространяются и достигают массового развития в окружающей среде, где нет обычных для них паразитов и хищников, существенно преобразуют структуру биоценозов, и их появление имеет глобальные экологические, экономические, а иногда, и социальные последствия. Достаточно назвать некоторые примеры инвазий, непосредственно касающихся нашей страны: сорняки рода амброзия, колорадский жук, золотистая нематода, гребневик мнемиопсис, ракек церкопагис, рыба ротан.

В настоящее время наиболее важным антропогенным источником инвазии водных беспозвоночных считается водный транспорт, а именно перенос организмов в составе сообществ обрастаний корпусов судов и с водным балластом. При современных масштабах судоходства процесс интродукции чужеродных видов с балластными водами судов принял глобальный характер и даже получил красноречивое название - "экологическая рулетка" [335,336].

Нерегулируемый сброс балластных вод в Балтийское море также привел к вселению в него более 20 чужеродных видов, значительная часть которых занесена судами из бассейнов Каспийского, Черного, Азовского морей и Северной Америки. Финский залив является одной из основных «горячих точек» Балтийского моря по уровню и риску инвазий [337]. Результатом «биологического загрязнения» водных экосистем чужеродными видами часто бывает сокращение видового разнообразия сообществ и изменение структуры трофических сетей, приводящее к эвтрофированию водного объекта и изменению качества воды, в том числе видоизменению биогеохимических циклов азота, фосфора и углерода. Такая трансформация водных экосистем может привести к дисбалансу в углеродном цикле, поскольку основную функцию в выводе CO₂ из атмосферы выполняют океанические гидробионты. На органическое вещество приходится 67,8 % всего закрепляемого углерода. [321].

Основным документом, подписанным с целью контроля экологического состояния вод, является Международная конвенция по предупреждению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78) принятая в 1983 году. Для предупреждения возможного негативного влияния выброса балластных вод в 2004 году была принята конвенция, устанавливающая правила контроля судовых балластных вод и осадков. Позже, в 2017 году, к конвенции

присоединилась Россия (Постановление Правительства от 28 марта 2012 № 256) [338, 339]. Согласно требованиям конвенции, суда должны оборудоваться системами управления балластными водами (СУБВ), основная задача которых обезвреживание сливаемой балластной воды до требований стандарта D-2, установленного этой конвенцией для предотвращения выброса жизнеспособных чужеродных организмов с балластной водой.

Разработка эффективных и экологически безопасных методов обеззараживания балластной воды является важным звеном в решении задач сохранения биоразнообразия и «здоровья» водных экосистем, и в конечном итоге глобального углеродного баланса.

В работе [340] выполнен анализ наиболее востребованных способов обезвреживания балластных вод (Рисунок 84). В настоящее время на мировом рынке наиболее распространена упрощенная технология – деактивация микроорганизмов УФ-излучением и микрофильтрацией до 50 мкм.

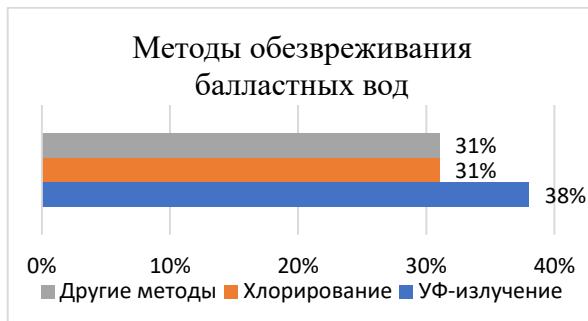


Рисунок 84 – Используемые методы обезвреживания балластных вод

Системы, в которых деактивация микроорганизмов происходит под действием УФ-излучения, по сравнению с другими типами СУБВ, малогабаритны и автоматизированы, однако имеют ряд недостатков:

- потребляемая мощность зависит от коэффициента пропускания УФ-излучения балластными водами и значительно возрастает, когда коэффициент падает ниже 80 % (в морской воде коэффициент в среднем составляет от 55 до 90 %);
- проблемы при эксплуатации в условиях современных российских реалий. Основным компонентом таких систем является реактор с УФ-лампами. На сегодняшний день УФ-лампы с достаточной мощностью для использования в СУБВ в России не выпускаются, вследствие чего приобретение зарубежных УФ-ламп приводит к повышенным логистическим затратам и сопряжено с санкционными рисками.

При обработке балластных вод методом хлорирования стоит вопрос о периодическом добавлении активного вещества из запасов, имеющихся на судне или хранящихся на базе/в порту. Также, возможно получение гипохлорита натрия NaCl

напрямую из морской воды посредством электролизера. К недостаткам такого типа СУБВ можно отнести:

- невозможность работы с водой соленостью менее 10 ‰ для судов класса «река-море» (актуально для СУБВ с гипохлоритом натрия);
- неспособность работы при отсутствии соответствующих вносимых реагентов;
- высокая токсичность хлора, вследствие чего требуются высокие меры безопасности.

Среди других методов обеззараживания наиболее перспективным представляется обработка балластных вод газообразным озоном. Озон, в силу своих высоких окислительных свойств, способен эффективно уничтожать патогенную бактериальную микрофлору (микроорганизмы, вирусы, бактерии, грибы, водоросли, их споры и цисты простейших). В качестве дезинфицирующего средства озон используется с конца 1800-х годов. Озон применяется для дезинфекции питьевой воды; для обработки сточных вод; в аквакультурной промышленности; для предотвращения болезней выращиваемых объектов аквакультуры [341, 342].

К настоящему времени выполнен ряд исследований, направленных на изучение способов обработки озоном именно морских балластных вод [343-345]. Исследователи оценивали эффективность различных режимов обработки озоном с точки зрения времени обработки, концентрации начальных доз озона и условий обработки, а также условий и времени хранения обработанных балластных вод. Полномасштабная система озонирования опытного образца была установлена в сентябре 2000 года и испытана на борту судна S/T Tonsina (Alaska Tanker Company) 869-футового нефтяного танкера [343]. Существенная характеристика обработки озоном морской воды в корабельном балластном контейнере заключается в том, что озонирование происходит в закрытом объеме и происходит длительное время контакта в темноте. Это может привести к более эффективной инактивации многих организмов, благодаря преимуществу гораздо более медленного остаточного распада в темноте и длительных времен контакта. Известно, что озон очень нестабильная молекула и при обработке озоном морской воды, образуются вторичные дезинфицирующие вещества, среди которых преобладает бромноватистая кислота в качестве основного дезинфицирующего агента (Рисунок 85).

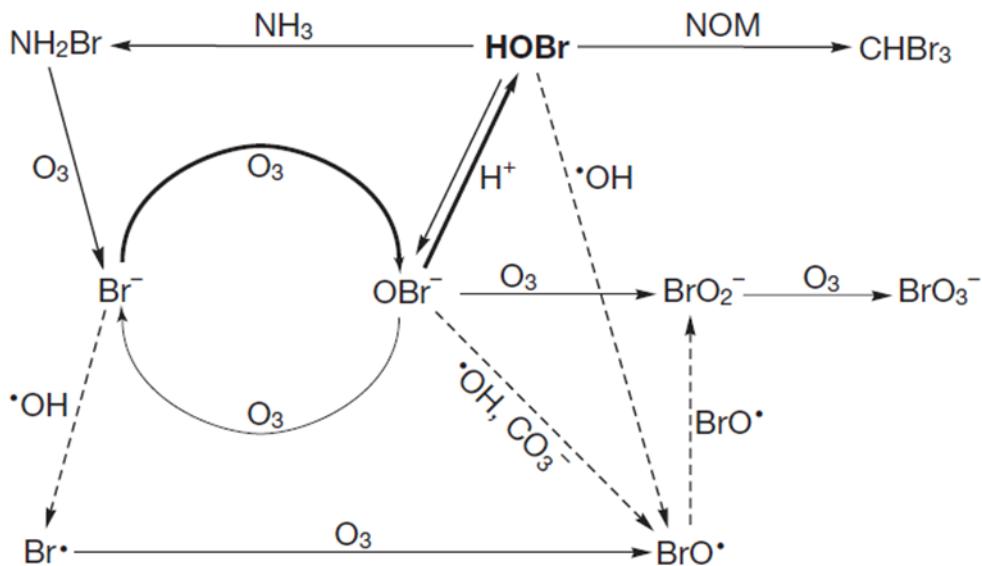


Рисунок 85 – Пути реакции при разложении озона в морской воде с образованием гипобромита (OBr^-), гипобромной кислоты (HOBr) и побочных продуктов дезинфекции - бромат-иона (BrO_3^-) и бромоформа (CHBr_3). NOM = натуральное органическое вещество. Толстые линии: предпочтительные реакции в морской воде, предложенные в результате экспериментов, проведенных на борту S/T Tonsina; тонкие линии: реакционные пути в бром содержащей воде; пунктирные линии: стадии реакции с участием свободных радикалов (Рисунок из [343] адаптированный из работы [346])

Вторичные дезинфицирующие агенты обычно выражаются и количественно оцениваются в виде общего количества остаточных окислителей (англ.TRO). Таким образом, «озоновая» токсичность наиболее правильно выражается как функция остаточных окислителей TRO, а не О₃ как таковая. Показано, что некоторые морские беспозвоночные и рыбы могут быть эффективно уничтожены после кратковременного (≤ 1 ч) озонирования при концентрации TRO менее 5 мг/л в виде Br₂, и что образовавшиеся в результате взаимодействия с озоном окислители могут накапливаться и оставаться токсичными в закрытых и темных контейнерах (при 10 °C) длительное время [347]. Озон удобно использовать для обработки балластной воды на судне, поскольку нет необходимости перевозки или хранения реагентов на судах, его можно дозировать в балластную воду во время приема или путем рециркуляции балластной воды в процессе озонирования во время транспортировки [335, 344]. Однако необходимо отметить, что эффективность обработки озоном балластных вод зависит от многих факторов, а именно концентрации озона и времени воздействия, а также абиотических и биотических характеристик балластных вод - pH, температура, соленость, содержание органических веществ, количество

микроорганизмов и т.д. [345]. Поэтому необходимо, прохождение пилотных испытаний всех разрабатываемых СУБВ с использованием озона перед установкой, чтобы гарантировать необходимую эффективность обезвреживания и экологическую безопасность сбрасываемой балластной воды для водоема-приемника. Стандарт D-2 Международной Конвенции устанавливает, что сбрасываемые балластные воды должны содержать менее 10 жизнеспособных организмов размером 50 мкм и более на один кубический метр и менее 10 жизнеспособных организмов размером от 10 до 50 мкм на один миллилитр, а также содержит особые требования для содержания индикаторных бактерий, используемых для целей стандартов охраны здоровья.

Целью данного исследования была оценка эффективности в соответствие со стандартом D-2 Международной Конвенции опытного образца, разрабатываемой СУБВ для обезвреживания балластных вод различной солености и оценка токсичности обработанной воды.

На данном этапе исследование балластных вод проводилось только в отношении воздействия газообразного озона на микроорганизмы размерами $\geq 10\text{мкм}$ на модельных соленых и пресной водах, исключая индикаторных бактерий.

Для озонирования вод использовалась система, включающая в себя несколько уровней обработки балластной воды (Рисунки 86-87).

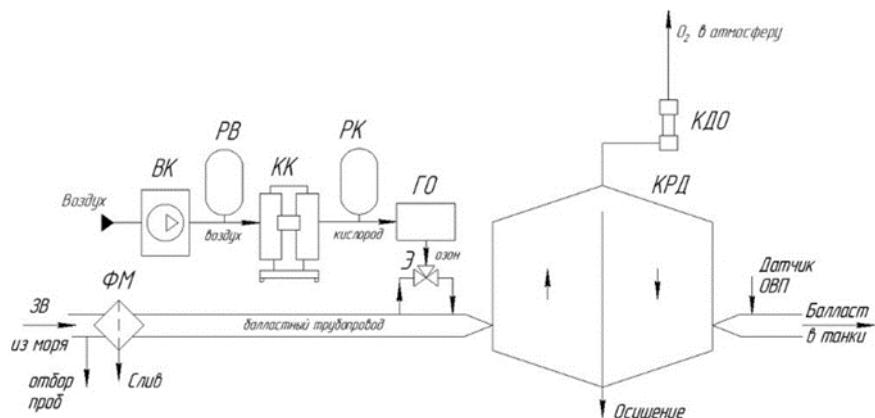


Рисунок 86 – Принцип обработки балластной воды при приеме: ЗВ – забортная вода, ФМ – фильтр механический, ВК – воздушный компрессор, РВ – ресивер воздушный, КК – кислородный концентратор, РК – ресивер кислородный, ГО – генератор озона, Э – эжектор, КРД – колонна растворения, КДО – каталитический деструктор озона, датчик ОВП – датчик окислительно-восстановительного потенциала

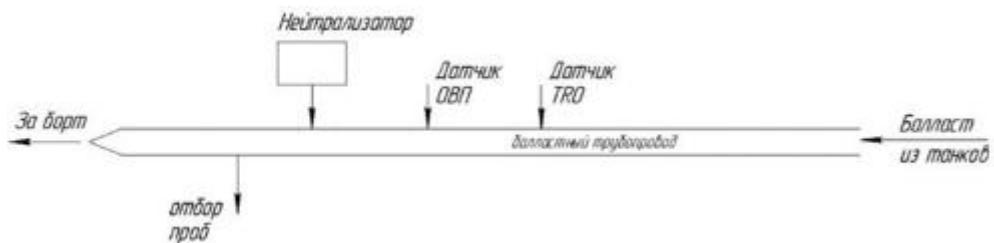


Рисунок 87 – Нейтрализация балластной воды при сбросе

В качестве модельной морской балластной воды различной солености для исследований были приготовлены: соленая (36 %) и солоноватая (18 %) воды, заселенные микроорганизмами до необходимого количества, удовлетворяющие требованиям для проведения испытаний СУБВ согласно Руководству Р8 [335] (Таблица 40). Вода бралась из системы морских аквариумов, населенной живыми организмами типичными для региона Баренцева моря. Заданная соленость в аквариумах поддерживается путем добавления в аквариумы морской соли Tropic Marin Bio-Actif с требуемым содержанием всех необходимых макро и микроэлементов. Для достижения необходимого количества микроорганизмов в воде для проведения испытаний СУБВ от 10 до 50 мкм использовались водоросли культуры Dunaliella семи видов, Chlorogonium sp, предоставленные Ресурсным центром «Культивирование микроорганизмов», которые вносились в воду исходя из предварительного расчета (Рисунок 88А). Для получения необходимой численности микроорганизмов размерной группы 50 мкм и выше использовались науплии эвригалинного солоноводного рака *Artemia salina*, которые выращивались из цист и тоже вносились в воду (Рисунок 88В). Культуры вносимых микроорганизмов выращивались в воде с соленостью, требуемой для эксперимента.



А



В

Рисунок 88 – А– Фото клеток морских водорослей *Dunaliella* sp. плотностью $1,7 \cdot 10^6$ в камере Горяева, В- наутилии артемии *Artemia salina* L в поле микроскопа

Для проведения экспериментов на природной пресной воде была отобрана вода из пруда. В воде из пруда состав микроводорослей представлен видами из 7 систематических групп: зеленые (*Chlorophyta*), цианобактерии (*Cyanophyceae*), диатомовые (*Diatomophyceae*), криптофитовые (*Cryptophyceae*), динофитовые (*Dinophyceae*), золотистые (*Chrysophyceae*) и эвгленовые (*Euglenophyceae*). Зоопланктон, в основном представлен коловратками из родов *Synchaeta*, *Asplanchna*, *Keratella* и инфузориями рода *Paramecium*. Предварительно были проведены исследования по определению требуемой концентрации и времени контакта озона на инактивацию микроорганизмов и терморезистентных бактерий в пресной природной воде.

Подготовленные воды, параметры которых представлены в таблице 6.1, в объеме 1000 л были обработаны озоном на опытном образце СУБВ (максимальная доза общего остаточного окислителя (TRO): окислительно-восстановительный потенциал 770 мВ) после чего был проведен подсчет выживших микроорганизмов и биотестирование качества воды на гидробионтах трех трофических уровней. Обработку озоном проводили в трех повторностях для каждой солености.

Определение pH и температуры проводили портативным влагонепроницаемым мультипараметровым анализатором Multi 340i (WTW, Германия) с погрешностью pH $\pm 0,01$. Растворенный кислород измеряли портативным измерителем растворенного кислорода с температурной компенсацией модели HI-9142 (Hanna Instruments, Германия) с погрешностью $\pm 2,5\%$. Компенсацию солености проводили с учетом таблиц растворимости кислорода в соленой воде. Соленость измерялась с помощью рефрактометра Kelilong RHS-10ATC (Kelilong Co., Ltd, Китай). Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) измерялся иономером И-510 (ООО «НПО Аквилон», Россия). Уровни растворенного озона в обработанной воде количественно определяли путем измерения ОВП.

Таблица 40 – Биологические показатели и параметры качества различных типов исходной воды

Параметр	Пресная вода		Солоноватая вода		Соленая вода	
	P8*	Достигнутая концентрация	P8	Достигнутая концентрация	P8	Достигнутая концентрация
Соленость, PSU	<3	0	3-32	18	>32	36
Растворимый органический углерод (DOC), мг/л	>1	14,5	>5	8,7	>5	5,7
Организмы $\geq 10\text{-}50$ м шт/мл)	≥ 1000	3200	≥ 1000	1400	≥ 1000	1200
Организмы ≥ 50 мкм (шт/л)	≥ 100	480	≥ 100	170	≥ 100	190
pH	-	8,1	-	7,8	-	7,9
Температура, °C	-	20	-	17,5	-	20
Растворенный кислород, мг/л	-	10,5	-	9,5	-	8,7

*- показатели требуемые руководством Р8

Для определения эффективности инактивации микроорганизмов подсчет живых особей проводили в воде, доставленной в лабораторию сразу после озонирования, и после хранения – через 24 ч, 48 и 96 часов. Обработанная вода сразу после измерения ее физико-химических параметров (одинаково для каждой солености исходной воды), подвергалась концентрированию до 100 литров на металлической сетке с ячейками менее 50 мкм. Для определения острой токсичности на микроводорослях, беспозвоночных и рыбах отбирали пробы обработанной воды в объеме 20 литров. Все отобранные пробы в сертифицированных полиэтиленовых контейнерах без свободного пространства сразу же отправлялись в лабораторию для исследований. Оценка содержания микроорганизмов проводилась согласно общепринятым методам подсчета планктонных микроорганизмов [348]. Фитопланктон определялся на люминесцентном микроскопе Альтами Люм, зоопланктон на бинокулярном микроскопе с трансфокатором 8:1 Leica Jupiter методом прямого счета. Количество клеток микроорганизмов от 10 до 50 мкм, включая 10 и 50 мкм, подсчитывали с использованием камеры Горяева, а количество клеток микроорганизмов от 50 мкм и выше подсчитывали с помощью камеры Богорова. Весь объем обработанной воды, за исключением воды отобранный для биотестирования, был просмотрен на наличие

микроорганизмов. В качестве контроля использовалась проба необработанной озоном контрольной воды, пропущенной через установку при холостом режиме.

Токсичность обработанной воды для трех трофических уровней (водоросли, ракообразные, рыбки) определяли стандартными методами биотестирования, допущенными для целей государственного экологического контроля. Сущность метода биотестирования на водорослях заключается в регистрации снижения численности клеток морских одноклеточных водорослей в анализируемой пробе исследуемого объекта относительно контрольной пробы. Сущность методов биотестирования на ракообразных и рыбках заключается в регистрации гибели организмов в анализируемой пробе относительно контрольной пробы при тестировании в течение 72 ч (96 ч). В качестве контроля использовалась культивационная вода.

Для биотестирования соленой (36 ‰) и солоноватой (18 ‰) воды использовались следующие тест-организмы и методики биотестирования:

1 Тестирование на задержку роста водорослей использовалась *Dunaliella salina* с использованием методических рекомендаций [349,350].

2 Тестирование на выживаемость ракообразных в соленой и солоноватой воде - использовались *Artemia salina* L. [351].

3 Тестирование на выживаемость молоди рыб в соленой и солоноватой воде - использовались *Poecilia reticulata* Peters [352].

Эти тесты обычно используются для оценки токсичности сточных вод, сбрасываемых в морские воды. Ранее было показано, что используемые виды являются одними из наиболее чувствительных организмов при воздействии токсичных химических веществ в морской воде и считаются подходящими заменителями местных видов.

Для пресной воды использовались следующие тест-организмы и методики тестирования:

1. Тестирование на задержку роста водорослей в пресной воде - использовались зеленые пресноводные одноклеточные водоросли *Scenedesmus quadricauda* (Тигр) Breb. [353].

2. Тестирование на выживаемость ракообразных в пресной воде - использовалась культура *Daphnia magna* Straus [329].

3. Тестирование на выживаемость молоди рыб в пресной воде - Использовались *Poecilia reticulata* Peters [353].

Исходя из значений ОВП для соленой и солоноватой воды перед биотестированием была проведена нейтрализация тиосульфатом натрия методом потенциометрического титрования до значений ОВП исходной воды, поскольку допустимая концентрация ТРО в

сбрасываемой за борт воде не должна превышать 0,1 мг/л для обеспечения безопасного сброса озонированной балластной воды. Биотестирование проводили в климатических комнатах при требуемых в использованных методиках температуре и повторности (от 3 до 5). Все тесты на токсичность были проведены в соответствии с критериями приемлемости тестов, требуемыми стандартами.

Эффективность обезвреживания балластной воды существенно зависит не только от дозы дезинфицирующего средства, но и от качества обрабатываемой воды. Для обеспечения приемлемой эффективности СУБВ установлены требования по достаточному содержанию органики в анализируемых водах [339]. Из таблицы 40 видно, что в приготовленных для обработки озоном соленой, солоноватой и взятой из природы пресной воде, все биологические и физико-химические параметры находились в приемлемых рамках, указанных в Руководстве Р8 [339].

9.4.1 Испытания на соленой и солоноватой воде

Эффективность СУБВ по инактивации микроорганизмов на соленой (36 %) и солоноватой (18 %) сведена в таблицу 41 при этом в исходной воде, которая служила контролем, наблюдалась 10 % смертность организмов в первые сутки и 50% смертность через 96 часов при хранении в закрытых емкостях без доступа света и кислорода.

Таблица 41 – Численность живых микроорганизмов в обработанной озоном соленой воде

Режим обработки	1				2				3			
Соленость, %	36				36				18			
Время удержания балластной воды, ч	1	24	48	96	0	24	48	96	1	24	48	96
Микроорганизмы от 10 до 50 мкм (шт. в 1 мл)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Микроорганизмы от 50 мкм (шт. в 10 л пробы),	15	1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ОВП (мВ)	64 0	405	315	23 0	730	640	634	28 0	768	38 0	26 0	24 0
Кислород (мг/л)	>2 0	19,5	10,5	8,5	16,7	17,9	13,7	9,0	>20	>2 0	>2 0	>2 0

Из таблицы видно, что обработанная озоном вода при всех режимах обладает окислительными свойствами в течение 2 суток, что согласуется с литературными данными о химических реакциях в обработанных озоном балластных водах на танкере S/T Tonsina со значениями ОВП в диапазоне 700 – 800 мВ [343]. Количество вторичных остаточных

окислителей в обработанной воде при втором и третьем режимах находится на достаточном уровне (ОВП обработанной воды 730 мВ и 768 мВ соответственно) для инактивации микроорганизмов, и вода удовлетворяет установленным требованиям уже через час после обработки. Инактивация микроорганизмов при обработке озоном балластной воды на первом режиме достигается только через 96 часов. Необходимо отметить, что мощность режима №3 для достижения требуемого уровня инактивации микроорганизмов в солоноватой воде (ОВП выше 700 мВ) выше, чем режима №1 и №2. Из таблицы следует, что не весь введенный озон прореагировал с бромом, которого в 2 раза меньше в приготовленной нами солоноватой воде, чем в соленой, поскольку содержание кислорода в обработанной воде находится на запредельном уровне и не уменьшается даже через 96 часов, что означает незавершенность процесса.

Оценка токсичности обработанной озоном на опытном образце СУБВ при режиме № 2 соленой и № 3 солоноватой нейтрализованной воды методами биотестирования на гидробионтах трех различных трофических уровней представленная в Таблице 42 показала, что при обработке соленой воды озоном, исследуемая вода после нейтрализации токсичной не является.

Таблица 42 – Оценка токсичности, обработанной озоном нейтрализованной соленой и солоноватой вод

Трофический уровень	Вид	Оцениваемый показатель	Воздействие, ч	Сравнение с контролем	Оценка токсичности
Водоросли	<i>Dunaliella salina</i>	Скорость роста	72	Снижения численности клеток менее 10 %	Не токсична
Ракообразные	<i>Artemia salina L</i>	Смертность	48	менее 5 %	Не токсична
Рыбы	<i>Poecilia reticulata</i>	Смертность	96	Нет отличий	Не токсична

9.4.2 Испытания на пресной воде

В пресной воде химия озона кардинально отличается от химии в морской воде, поскольку практически отсутствует бром. Поэтому для пресной воды был выбран режим озонирования № 3. Подсчёт выживших микроорганизмов после обработки в пресной воде сведен в таблицу 43.

Таблица 43 – Численность живых микроорганизмов в обработанной озоном пресной воде

	Обработанная озоном пресная вода			
	1-2 часа	24 часа	48 часов	96 часов
Микроорганизмы от 10 до 50 мкм (шт. в 1 мл)	3	3	4	7
Микроорганизмы от 50 мкм (шт. в 1 мл)	9	1	0	0
Кислород (мг/л)	>20	>20	15,7	10,7
ОВП (мВ)	346	290	260	248

Согласно результатам выполненных исследований (Таблица 44) на трех трофических уровнях установлено, что пресная вода, обработанная озоном, токсичной не является.

Таблица 44 – Оценка токсичности обработанной озоном пресной воды

Трофический уровень	Вид	Оцениваемый показатель	Воздействие, ч	Сравнение с контролем	Оценка токсичности
Водоросли	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Тигр) Breb	Скорость роста	72	Снижения численности клеток менее 10 %	Не токсична
Ракообразные	<i>Daphnia magna</i> Straus	Смертность	96	Нет отличий	Не токсична
Рыбы	<i>Poecilia reticulata</i>	Смертность	96	Нет отличий	Не токсична

В ходе проведенных исследований по обезвреживанию модельных балластных вод различной солености на опытном прототипе СУБВ были экспериментально определены уровни озона, необходимые для эффективной инактивации микроорганизмов в соответствии со стандартом D-2 Международной Конвенции. Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует обратно пропорциональная связь между концентрацией озона, количественно выраженной значениями окислительно-восстановительного потенциала, и соленостью обрабатываемой воды. Отсутствие токсичности, обработанной на опытном прототипе СУБВ воды, свидетельствует о возможности сброса за борт экологически безопасных для водоема балластных вод.

10 Систематизация и сравнительная оценка институциональных механизмов климатически релевантной трансформации экономики, формирующих рамочные условия результативного участия ключевых эмитентов климатически активных газов в секвестрационных проектах

Для оценки институциональных режимов, служащих переходу к низкоуглеродному развитию и выработке предложений по их модернизации в России целесообразно вновь вкратце напомнить результаты 2022 года, для которых был характерен тренд на увеличение выбросов ПГ. Согласно Докладу ООН (2022), выполнение текущих обязательств стран по адаптации к изменению климата и сокращению эмиссии ПГ в общемировом масштабе позволит снизить указанные выбросы лишь на 10%, что вызовет к концу XXI века глобальное потепление уже на 2,8 °С [354]. Что касается отраслевых приоритетов, то центральную роль в решении задачи перехода к низкоуглеродному развитию продолжает играть энергетический сектор [355-357], на долю которого приходится более 73% всех выбросов ПГ в мире и около 78% в РФ. Для выработки предложений по модернизации сформированных в последние годы институциональных режимов реализации климатической и энергетической политики и обоснования соответствующих рекомендаций для России остановимся на сформированном в рамках отраслевого конкурентного анализа варианте классификации регуляторных режимов, который был адаптирован авторами отчета к задачам классификации климатической политики и связанной с нею политики зеленого энергоперехода – см. таблицу 45.

Таблица 45. Типы институциональных режимов, формирующих рамочные условия эффективного участия ключевых эмитентов ПГ в климатических проектах

Типы институциональных режимов в зависимости от степени вмешательства государства и характера применяемых стимулов	Цели и инструменты регулирования
1. Пассивная роль государства при негативных или отсутствующих стимулах	Свобода рыночного механизма при контроле, ограничениях и наказаниях напр. за доминирующее положение и нарушения конкурентных норм, несоблюдение экологических и климатических норм
2. Пассивная роль государства при позитивных стимулах	Формирование благоприятной экономической среды на базе инструментов 1-го типа, дополненных налоговыми, финансовыми и правовыми мерами поддержки
3. Активная роль государства при преобладании негативных стимулов	Задатчная секторальная и торговая политика (с повышением барьеров) для противодействия угрозам, например, со стороны ЕС в связи с введением трансграничного углеродного регулирования

4. Активная роль государства, поддерживаемая позитивными стимулами	Kоординация национальной климатической политики во взаимосвязи с энергетической, промышленной и структурной. Государство как поставщик капитала и проводник стимулов
5. Активная, позитивные с прямым вовлечением государства в производство	Государство как предприниматель и инноватор (через деятельность различного типа публичных предприятий)

Россия, следуя мировым трендам, в 2020 году приняла обязательства по национальному вкладу в снижение выбросов ПГ, в октябре 2021 г. утвердила Стратегию социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, целевой сценарий которой допускает достижение углеродной нейтральности к 2060 году (далее – СНУР РФ 2050). В марте 2023 года был утвержден Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года.

Вместе с тем с учетом специфики текущего момента принятые ранее планы и стратегии подвергаются определенной корректировке, в том числе вынужденно в условиях расширения санкционного режима, который охватывает и НДТ, предназначенные для выхода страны на траекторию климатически релевантного низкоуглеродного развития. Тем не менее задачи снижения углеродоемкости производимой продукции и сокращение углеродного следа прежде всего в приоритетном в данном аспекте перечне отраслей, к которому относятся, наряду с топливно-энергетическим сектором, промышленность, сельское хозяйство, включая животноводство, транспорт, строительство и городская инфраструктура [358], находятся в поле внимания федеральных регуляторов. Этому способствует и реализация Федерального закона «Об ограничении выбросов ПГ» (№ 296-ФЗ), в соответствии с которым определены регулируемые организации (РО), хозяйственная и иная деятельность которых сопровождается существенными выбросами ПГ. Конкретно, речь идет о наиболее крупных предприятиях, масса выбросов которых эквивалентна 150 тыс. т и более СО₂ в год, которые представляют отчеты о выбросах ПГ с 01.01.2023 и с 01.01.2025 – организации с выбросами ПГ массой 50 тыс. т и более СО₂ эквивалента в год. Юридица и индивидуальные предприниматели, не относящиеся к РО, вправе представлять отчеты о выбросах ПГ добровольно (ст. 7 № 296-ФЗ), а также реализовывать климатические проекты. На базе поступающей от РО информации формируется Реестр выбросов ПГ в качестве одной из государственных информационных систем, которая обслуживает вводимый механизм. Реализацию климатических проектов обслуживаю углеродные единицы (UE) и реестр UE, который является второй информационной системой вводимого механизма, служащей регистрации КП и ведению учета UE и операций с ними. В итоге этих мер должны быть сформированы условия для перехода от системы обращения и зачета UE

(с их помощью производится оценка и верификация реализуемых РО климатических проектов) к механизму торговли квотами на выбросы ПГ, аналогичному международным системам. На это нацелен Федеральный закон «О проведении эксперимента по ограничению выбросов ПГ в отдельных субъектах РФ» (от 06.03.2022 N 34-ФЗ). Согласно этому Закону, в рамках отдельных регионов, которые принимают решение об участии в региональном эксперименте по аналогии с Сахалинской областью, утверждается Стратегия по достижению углеродной нейтральности с определением года ее достижения в регионе. Параллельно вводится система квотирования выбросов, а также оборот выбросов ПГ в эквиваленте CO₂ с установлением цен на UE. Для реализации этого закона Правительством Сахалинской области в ноябре 2022 года была утверждена «Программа проведения эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов на территории Сахалинской области» [359].

Проведенный в отчете и в профильной литературе анализ действующего в России институционального режима перехода к климатически релевантному низкоуглеродному развитию, в том числе при сравнении его с инструментами и стимулами, применяемыми в регионах и странах, ориентированных на занятие лидирующих позиций в этой области, показывает наличие многих проблем и неиспользованных возможностей. В их числе: отсутствие Операционного плана действий по реализации Стратегии низкоуглеродного развития; необходимость обновления ряда утвержденных отраслевых стратегий по развитию секторов ВИЭ, в том числе в области водородной энергетики, электротранспорта, распределенной атомной энергетики и др.; отсутствие возможности увеличение доли ВИЭ в энергобалансе страны, на что делается один из основных акцентов в большинстве стран, реализующих стратегии низкоуглеродного развития; ограниченное распространение практики перехода на НДТ и учета в них требований по поэтапному достижению углеродной нейтральности; отработка механизма функционирования углеродных бирж и других механизмов обращения UE и стимулирования снижения углеродоемкости с принятием соответствующих нормативно-правовых документов и др.

Наряду с этим имеют место и другие разрывы в области нормативно-правового регулирования. Так, в России все еще отсутствует полномасштабное налогообложение (платный порядок компенсации) углеродных выбросов. Так, согласно ст. 8 № 34-ФЗ, в России с сентября 2022 г. предполагалось введение лишь платежей за превышение установленной региональным регулируемым организациям квоты на выбросы ПГ в регионах проведения соответствующего эксперимента. Не преодолено и отставание с разработкой и применением систем торговли квотами на выбросы ПГ (аналогичной ETS), которые в качестве давно внедренных в хозяйственную практику механизмов,

обслуживают оборот УЕ во многих странах и регионах мира, включая, что особенно важно, основных внешнеторговых партнеров России из дружественных стран. Экспериментальная отработка подобного механизма согласно Федеральному закону №-34-ФЗ, началась с 01.09.2022 и пока ведется только в Сахалинской области с возможностью добровольного подключения других регионов страны к эксперименту по ограничению выбросов ПГ и биржевой торговле УЕ.

Нуждаются в современном нормативно-правовом сопровождении и проекты сектора карбонового секвестрационного земледелия, которые могут реализовываться на базе сельскохозяйственных и лесных угодий и которые применительно ко второй из перечисленных разновидностей именуются лесоклиматическими. Такие проекты имеют приоритетное значение для решения задачи обоснования путей трансформации карбоновых полигонов в сеть экономически результативных региональных карбоновых ферм, способствующих обоснованию вариантов масштабирования различных климатических проектов и технологий, включая лесо- и агроклиматические проекты, а также CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage) проекты и технологии по улавливанию, использованию и хранению CO₂. Специального внимания заслуживает и проблема разработки и реализации в этой части институционального режима перехода к климатически релевантному низкоуглеродному развитию, в том числе на базе обобщения эксперимента по ограничению выбросов ПГ в отдельных субъектах РФ, проводимого на базе соответствующего Федерального закона N 34-ФЗ от 06.03.2022.

С точки зрения степени государственного вмешательства в экономику и характера применяемых стимулов формируемый в России регуляторный режим характеризуется активным участием государства при согласовании вводимых в стране механизмов с международной практикой в этой области. Вместе с тем реализуемые в стране меры, как было показано в литературе [360-361] и подтверждено в данном отчете, вводятся все еще не в полном объеме и с существенным отставанием от стран и регионов лидеров в области климатического регулирования, что не может не ослаблять вводимый ими эффект с позиции международной конкурентоспособности, особенно средне- и долгосрочной. Аналогично это касается затягивания с согласованием экономических стимулов для поддержки вводимых институциональных механизмов и доведения их до бизнеса. Вместе с тем предусмотрено участие бизнеса в определении ряда параметров вводимого механизма квотирования выбросов ПГ, что можно расценить как позитивный момент. Так, согласно Федеральному закону №34-ФЗ в статье 7, п. 2 предусмотрено участие региональных регулируемых организаций в общественных слушаниях по подготовке программы проведения эксперимента, а статьей 8, п. 1 предусмотрено участие региональных

регулируемых организаций в общественном обсуждении проектируемых квот на выбросы ПГ. Поддержание баланса внешней торговли, сохранение позиций на международных рынках, обеспечение углеродонейтрального экономического развития требуют радикального изменения приоритетов в отношении климатической и энергетической политики РФ, связанных с обеспечением энергоперехода, стимулированием импортозамещения и нетопливного экспорта, в том числе новых низкоуглеродных продуктов и технологий.

10.1 Институциональные режимы углеродного регулирования и оптимизация низкоуглеродных стратегий приоритетных секторов российского бизнеса

В условиях геополитической нестабильности, санкционного давления и недоступности высокотехнологичных решений декарбонизации производственно-технологических процессов российским компаниям углеродоемких секторов необходимо разрабатывать проактивные стратегии достижения углеродной нейтральности для сохранения долгосрочной конкурентоспособности на международных рынках. В то же время, учитывая текущие условия оптимальным инструментом для разработки наилучших стратегий является сценарный подход.

При разработке сценариев в условиях неопределенности авторами предложено два ключевых фактора, которые будут влиять на разработку стратегии декарбонизации российских углеродоемких секторов экономики в среднесрочной перспективе на период до 2030 г.:

1) Согласно докладу ООН о разрыве в уровне выбросов за 2022 г., для достижения цели по удержанию глобального потепления в пределах 1,5 °С странами должны быть пересмотрены показатели сокращения выбросов ПГ с 10 % в среднем до 45 % к 2030 г. Увеличение показателей ОНУВ, которое произошло в 2025 году, ужесточит требования по сокращению выбросов климатически активных газов и налогообложению углеродоемких секторов в краткосрочной и среднесрочной перспективах. Так, в сентябре 2025 года показатель ОНУВ РФ обновлен до более амбициозного уровня, так сокращение выбросов парниковых газов к 2035 году должно составить 65–67% относительно уровня 1990 года. Для сохранения конкурентоспособности на международных рынках российским углеродоёмким секторам экономики необходимо будет осуществлять значительные инвестиции в технологии декарбонизации в сжатые сроки. Если в дальнейшем ОНУВ стран останутся на прежнем уровне или будут сокращаться, то в среднесрочной перспективе технологическая структура мирового производства будет изменяться постепенно и у российских компаний будет время для подготовки поэтапного перехода к углеродной

нейтральности, включая выбор и разработку собственных технологических решений в области декарбонизации, что позволит занять конкурентные позиции на новых рынках.

2) Второй сценарий исходит из пессимистической предпосылки о дальнейшем осложнении геополитической ситуации, что может привести к осложнению доступа к передовым технологиям и международному рынку капитала. Падение спроса на российские энергетические ресурсы сократит экспортные доходы и возможности для декарбонизации других углеродоемких секторов экономики. Поставки топливных ресурсов из России трактуются недружественными странами в качестве одной из главных причин энергетического кризиса, и в дальнейшем при планировании экспортно-импортных операций страны будут избегать новых уязвимых мест, возникающих из-за высоких и неустойчивых цен на критически важные ресурсы. При ослаблении геополитической напряженности санкции против РФ будут сняты, возобновятся зарубежные поставки тех наилучших доступных технологий декарбонизации, которые продолжали оставаться дефицитными и в условиях реализации политики импортозамещения, российские компании вновь обретут конкурентное положение на рынке энергоресурсов и станут активными игроками на международных рынках углеродных единиц.

Несмотря на неопределенное развитие двух ключевых факторов, для всех сценариев есть неизбежное будущее, которое связано с сохранением актуальности задач климатической повестки, что подтверждается созданием экономических стимулов в виде налоговых мер (применение нулевой ставки по налогу на прибыль и НДС в отношении торговли ЕС), переориентацией партнерских отношений России с западных стран на восточные, преобладанием в структуре ТЭК ископаемых видов топлива, в первую очередь природного газа, а также приоритетом развития за счет внутренних сырьевых, человеческих, технологических ресурсов и возможностей. Изменение ключевых факторов и неизбежное будущее играют определяющую роль для разработки оптимальных стратегий декарбонизации российских углеродоемких предприятий (Рисунок 89).

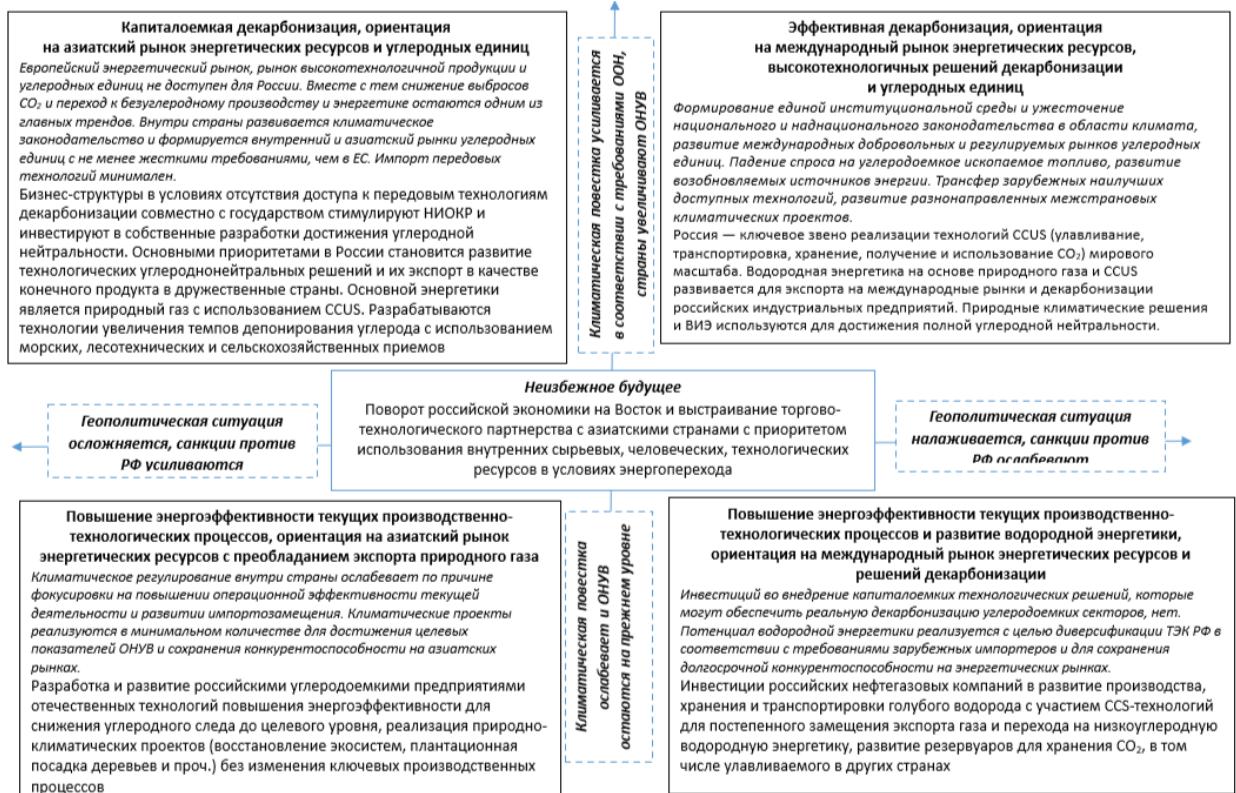


Рисунок 89 – Стратегии декарбонизации в условиях альтернативных сценариев изменения геополитической ситуации и задач климатической повестки на период до 2030 г.

Важной является активная политика государства в области настройки регуляторных режимов, т.к. при пассивном режиме климатического регулирования могут быть обеспечены лишь краткосрочные положительные эффекты для углеродоемких секторов экономики, которые могут обернуться снижением конкурентоспособности в долгосрочной перспективе.

Таким образом, в рамках первого этапа проекта были разработаны ключевые направления стратегий декарбонизации в условиях альтернативных сценариев изменения геополитической ситуации и задач климатической повестки на период до 2030 г.

10.2 Финансовые модели углеродного регулирования: международная практика и особенности внедрения в Российской Федерации

Как показало проведенное исследование, финансовая модель углеродного регулирования в Российской Федерации находится на раннем этапе развития, для которого характерны: определяющее значение инициатив государства и крупного бизнеса; мягкое регулирование при ограниченном объеме мер государственной поддержки; системообразующая роль углеродного рынка; интеграция его добровольного и обязательного сегментов; региональный подход к развитию углеродного рынка

обязательных требований, реализуемый в формате правовых экспериментов; унификацию рамочных условий региональных климатических экспериментов и единые методические подходы к формированию перечня регулируемых организаций и размеров квот выбросов ПГ. Выбор мягкого подхода к углеродному регулированию имеет сигнальный эффект и обеспечивает определенные преимущества для бизнеса, но создает меньше стимулов к снижению углеродоемкости, создавая такие вызовы, как эффект «зеленого парадокса», риски импорта экологических проблем из стран с более жесткими климатическими требованиями, проблемы зеленого камуфлирования. Необходимо принимать во внимание изоляцию России от ведущих независимых систем торговли углеродными единицами международного уровня, функционирование которых обеспечивается компаниями из недружественных стран.

В этих условиях востребован поиск эффективных методических подходов к обоснованию финансовых решений по вопросам обеспечения регионального углеродного рынка, которые могут быть приняты на субфедеральном уровне. При обосновании данных решений должны учитываться рамочные условия реализации климатического эксперимента и его программа (при наличии). Основой обоснования релевантных решений в этой области должна выступать оценка экономической конъюнктуры в стране, регионе и приоритетных отраслях региональной экономики, финансовое состояние регулируемых организаций, уровень устойчивого развития субъекта федерации. Область компетенций региона по финансовым вопросам развития углеродных рынков подразделяется на два основных направления: развитие рыночной инфраструктуры и совершенствование системы финансовой поддержки регулируемых организаций, предусматривая решения, связанные с введением нового финансового инструментария. В рамках первого направления финансовые решения региона могут быть связаны прежде всего с работой карбоновых полигонов и ферм, а для финансовых центров национального уровня (Москвы и Санкт-Петербурга) – также с функционированием биржевого сегмента углеродного рынка. Финансовую поддержку регулируемых организаций, с нашей точки зрения, нецелесообразно ограничивать бюджетной составляющей, отдавая приоритет концепции смешанного финансирования, предполагающей объединение ресурсов региона и бизнеса, а также разные формы регионального участия.

К числу результатов проведенного исследования относятся следующие: представлен систематизированный обзор финансовых моделей углеродного регулирования, применяемых в международной практике, предложены методические рекомендации по обоснованию финансовых решений в области инфраструктурного, институционального, инструментального обеспечения региональных углеродных рынков в РФ, которые могут

быть приняты на уровне субъектов федерации, а также при разработке программ региональных климатических экспериментов в Российской Федерации.

11 Разработка и оптимизация бизнес-моделей углеродного земледелия на карбоновой ферме с целью дальнейшей трансляции бизнесу

Как было отмечено ранее, Россия сохраняет свою активную позицию в части противостояния глобальным климатическим рискам, что находит свое отражение в актуальных стратегических целях и приоритетах, включая Обновленную Климатическую доктрину РФ, в которой подтверждена цель достижения углеродной нейтральности к 2060 году. Целевой сценарий Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов ориентирован на сокращение нетто-выбросов с 1584 млн т CO₂-экв в 2019 году до 630 млн т CO₂-экв к 2050 году – более чем на 60%. При этом акцент в Стратегии сделан на увеличение поглощения парниковых газов, в том числе за счет реализации лесо- и агроклиматических проектов, более чем в 2 раза – до 1200 млн т CO₂-экв. Снижение эмиссии ПГ планируется к 2050 г. на 289 млн т CO₂-экв, что лишь на 13,6% ниже уровня 2019 года.

Отечественные специалисты разрабатывают более сбалансированные и прагматичные сценарии достижения целей низкоуглеродного развития в России. Авторы отчета разделяют мнение коллег о том, что достижение целей низкоуглеродного развития в России, включая достижение углеродной нейтральности, должно осуществляться более сбалансированным и экономически целесообразным путем, учитывающим ключевые технологические и организационные возможности и особенности. Для решения этой задачи необходимо, в первую очередь, выявить обладающие наибольшим потенциалом направления декарбонизации экономики, которые должны быть включены в число приоритетов российской климатической политики.

Следуя этой цели, в работе [362] был выполнен статистический анализ факторов углеродоемкости национальной экономики на базе актуализированных данных о динамике удельных выбросов десяти крупнейших стран-эмитентов парниковых газов в период с 1990 по 2019 год (Рисунок 90).

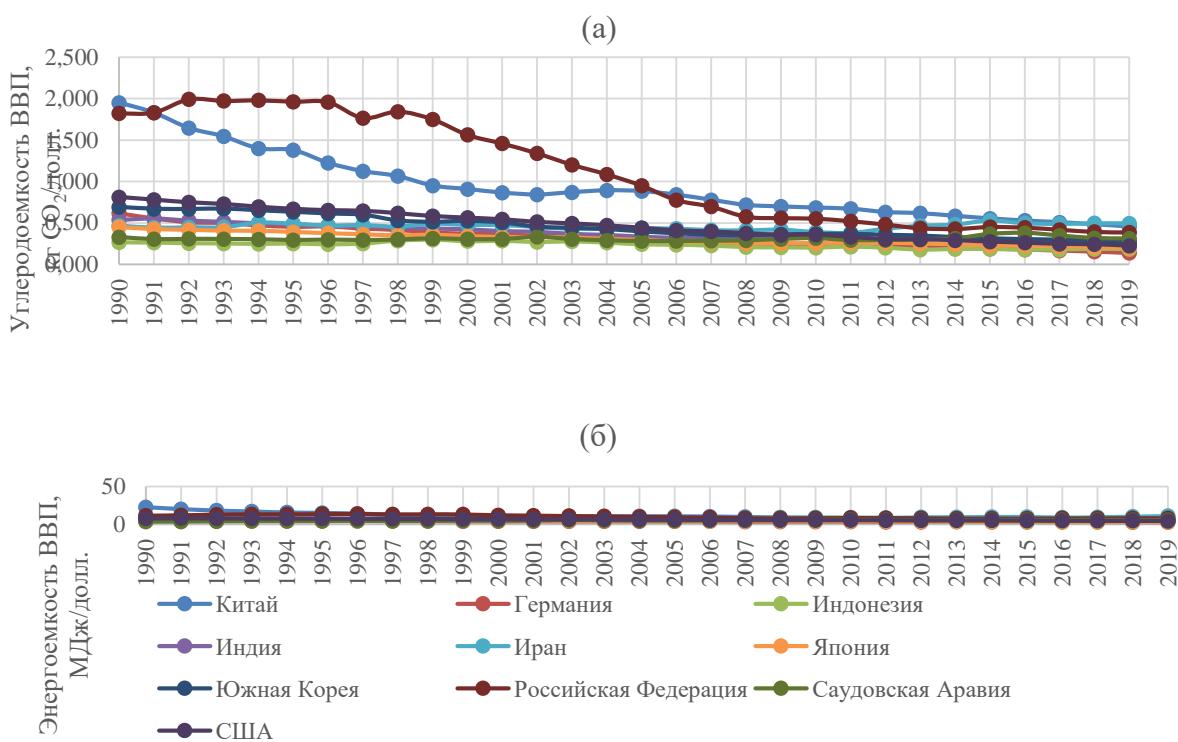


Рисунок 90 – Динамика (а) углеродо- и (б) энергоемкости ВВП крупнейших стран-эмитентов ПГ [Составлено авторами на основе данных ClimateWatch и IEA]

Результаты сравнительного и корреляционно-регрессионного анализа показали, что важнейшим фактором снижения углеродоемкости экономики этих стран было сокращение энергоемкости их ВВП, которое может быть достигнуто за счет интенсивного, ориентированного на декарбонизацию, развития энергетической отрасли.

В работе [363] отмечается определенный интерес к реализации лесоклиматических проектов, а также внедрению CCUS-технологий, среди экспортно-ориентированных нефтегазовых и нефтехимических компаний, но не со стороны компаний теплоэнергетической отрасли. Есть основания предположить, что российские энергоснабжающие компании, попадающие под углеродное регулирование, ввиду низкой рентабельности, а в случае теплоснабжения - даже убыточности своей деятельности не имеют достаточных инвестиционных ресурсов для реализации подобных проектов собственными силами. Отчасти эта проблема может быть решена за счет трансформации бизнес-модели климатических проектов, центральным звеном которой должны быть их исполнители, а не заказчики [363]. Это откроет для энергетических компаний, чей внутренний резерв по сокращению выбросов ПГ ограничен, возможность участвовать в таких проектах или приобретать углеродные единицы, удовлетворяя тем самым требованиям углеродного регулирования.

Полученные авторами результаты исследования подтверждают, что именно энергетика, относясь к числу основных источников выбросов парниковых газов, должна быть в центре внимания федеральных и региональных властей, а также бизнеса при разработке и реализации стратегии низкоуглеродного развития. Снижение энергоемкости ВВП, с одной стороны, может быть ключевым фактором декарбонизации национальной экономики, поскольку любая хозяйственная деятельность сопровождается потреблением энергоресурсов. А, с другой – выработка таких энергоресурсов, как электрическая или тепловая энергия, приводит к выбросам значительных объемов парниковых газов при сжигании ископаемого топлива. Потребление топлива, например, на транспорте также сопровождается эмиссией вредных веществ в атмосферу. В результате повышение энергетической эффективности технологических процессов, а также переориентация на менее углеродоемкие источники энергии (атомная, гидроэнергия и другие ВИЭ) могут иметь значительный эффект, обусловленный сокращением выбросов парниковых газов в масштабах страны или региона, а также снижением углеродного следа компаний, что является одной из ключевых целей устойчивого низкоуглеродного развития.

Таким образом, технологическая модернизация и структурное преобразование российской энергетики обладают значительным потенциалом в области достижения цели углеродной нейтральности. Указанные меры, соответственно, должны быть включены в число приоритетных направлений не только энергетической, но также климатической и социально-экономической политики страны. Развитие эффективной и менее углеродоемкой энергосистемы должно быть и приоритетом климатической политики регионов, а внедрение энергоэффективных и энергосберегающих практик следует включать в число направлений стратегий низкоуглеродного развития бизнеса. Однако, без решительного пересмотра принципов управления и реформирования российской энергетики достижение заявленных амбициозных целей в части повышения эффективности и снижения углеродоемкости вызывает сомнения. Это определяет целесообразность более углубленного изучения основных организационно-экономических барьеров, препятствующих результативной трансформации энергетики в России, с разработкой комплекса рекомендаций по их устранению.

11.1 Уточнение оценки углеродного следа аграрного сектора Северо-запада РФ в ходе реализации Стратегии развития производства органической продукции в РФ на период до 2030 года в части увеличения площади земель, отводимых для применения технологий органического земледелия

Проектом ОП СНУР предусмотрена широкая совокупность мероприятий, именуемых КП, обеспечивающих сокращение (предотвращение) выбросов ПГ и (или) увеличение их поглощения. Соответственно, формируется широкий пул технологий, которые могут лечь в основу реализации КП. И задача выбора наиболее целесообразных из них как представителями регулирующих органов, так и бизнесом является весьма сложной. Для отбора оптимальных решений необходимо учитывать множество факторов, связанных с нормативно-правовым регулированием, экономической эффективностью, технологической готовностью и разными типами рисков применения тех или иных технологий КП. Авторский подход, основанный на системе из 10 критериев, предполагает отбор и ранжирование технологий и проектов КП по сумме баллов, которые присваиваются по двоичной системе: 0 и 1 балл. Ключевой акцент СНУР РФ в достижении углеродной нейтральности сделан на реализации КП с участием природных экосистем. Поэтому, следуя данному документу, в дальнейшем внимание будет сосредоточено на приоритизации технологий природных КП в секторе ЗИЗЛХ с учетом представленной процедуры отбора на основе разработанной системы критериев (Таблица 46).

Таблица 46. Ранжирование технологий, используемых в природных КП

Технология	Критерий										Оценка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Авиалесоохрана	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
Введение дистанционного мониторинга лесов	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	9
Аллейная посадка	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	8
Обводнение осущеных торфяников	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8
Точное земледелие	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
Улучшенное управление лесами	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	8
Применение нулевой обработки почвы (no-till)	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	7
Обустройство ветрозащитных полос	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	7
Увеличение площади посадок с/х культур с высоким секвестрационным потенциалом (экстенсивный путь)	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	7
Обустройство прибрежных лесов	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
Традиционное лесоразведение	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	7
Введение комплексного севооборота	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	7
Внесение биочара в почву	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	7

Технология	Критерий										Оценка
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Применение покровных культур	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	6
Мульчирование	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	6
Традиционное лесовосстановление	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	6
Консервация и охрана высокопродуктивных лесов	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
Применение новых сортов и видов с/х культур с повышенной секвестрацией (интенсивный путь)	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	5
Мультидревесные посадки	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	5
Комбинированное применение органических и химических удобрений	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	5
Известкование почв	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	5
Лесоразведение с применением новых древесных пород с повышенной секвестрацией	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	4
Применение биопрепараторов для подкармливания	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	4
Применение биопрепараторов для борьбы с вредителями и болезнями	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	4
Иrrигация	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	4
Обустройство лесных ферм	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	4
Обустройство лесных пастбищ	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	4
Применение новых сортов и видов с/х культур с пониженной способностью к эмиссии парниковых газов	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	4
Применение tandemной посадки нескольких с/х культур	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3
Интеграция более продуктивных пород деревьев и растительного состава в существующие лесные экосистемы	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	3
Подтопление почв	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2

С помощью проведенной процедуры отбора и ранжирования технологий КП выявлено, что наиболее перспективными являются авиаlesоохрана, включая дистанционный мониторинг, обводнение торфяников, традиционное лесоразведение (смешанный лес). Для отобранных технологий осуществлено *финансовое моделирование вариативных сценариев реализации КП*. Согласно предварительному анализу чувствительности, цена УЕ и объем депонирования CO₂-е при применении разных технологий, лежащих в основе КП, наиболее сильно влияют на экономическую эффективность его реализации. В зависимости от изменения этих параметров строятся четыре вариативные сценария реализации климатических проектов (Рисунок 91). Наиболее привлекательным проектом с точки зрения экономической эффективности в случае реализации оптимистичного сценария, для которого, напомним, характерны максимальный

объем депонирования CO₂ и постепенный рост цены на УЕ до 8 500 руб. / т CO₂-е к 2030 г., является авиаалесоохрана, включающая в том числе технологию дистанционного мониторинга. КП, основанный на данном типе технологий, также показывает положительные результаты в трех из четырех вариативных сценариях. При реализации пессимистичного сценария ни один из проектов не окупается, но меньший отрицательный эффект приносит проект, основанный на технологии вторичного обводнения торфяников. Традиционное лесоразведение не показывает положительного результата ни в одном из вариантов в связи с временным лагом между посадкой саженцев и получением первых УЕ, который составляет 15 лет. Поэтому реализация КП с применением технологии традиционного лесоразведения требует государственной поддержки и софинансирования, поскольку объем поглощения CO₂ за период реализации проекта в расчете 1 га выше в сравнении с авиаалесоохраной.

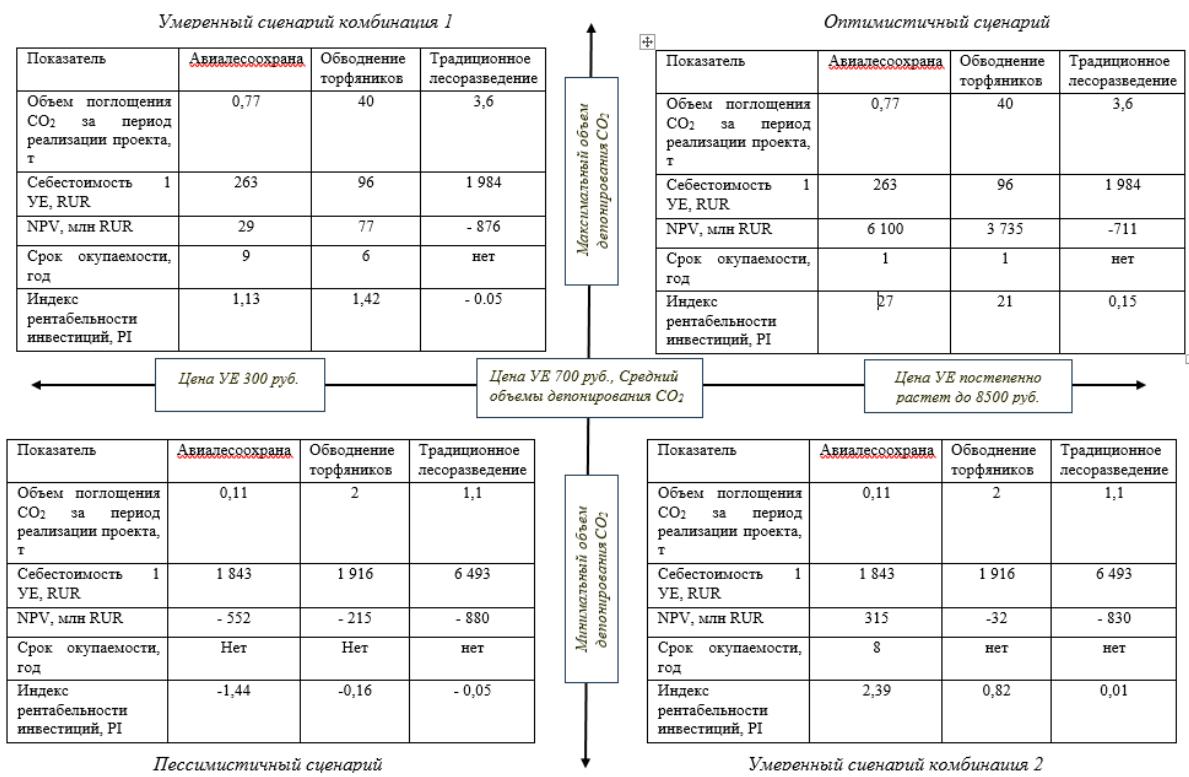


Рисунок 91 – Результаты финансового моделирования вариативных сценариев при реализации природных КП

В связи со слабой заинтересованностью предприятий участвовать в реализации КП ввиду их недостаточной коммерческой целесообразности при значительных экосистемных выгодах для территорий, в том числе в случае проектов по адаптации к изменениям климата, самостоятельное значение имеет разработка системы финансирования и механизмов сокращения и компенсации затрат на их реализацию. Рассмотрим

существующие подходы, которые реализуются в международной практике в области финансирования КП и оптимизации затрат:

- КП, обладающие высоким потенциалом депонирования углерода и сокращения эмиссии ПГ, но низкой экономической эффективностью целесообразно софинансируовать в рамках государственно-частного партнерства для оптимизации затрат бизнес-структур;

- В связи с высокими инвестиционными затратами на декарбонизацию производственно-технологических процессов и продуктов себестоимость готовой продукции возрастает, и она становится неконкурентоспособной по цене, поэтому особой актуальностью обладают государственные закупки, гарантирующие стабильный сбыт углеродонейтральной продукции, в том числе зеленой энергии;

Фондовая и грантовая поддержка актуальна для осуществления НИОКР в области климатических технологий. Например, в ЕС действует инновационный фонд с объемом финансирования 10 млрд евро для поддержки проектирования низкоуглеродных инновационных технологий;

- Налоговые льготы в части НДС и налога на прибыль способствуют развитию коммерциализируемых технологий. Например, в разделе 45Q Налогового кодекса США закреплены льготы по налогу на прибыль за улавливание и хранение CO₂ для внедрения и развития CCS-технологий;
- Эффективным способом оптимизации затрат является масштабирование технологий, так, стоимость энергии, получаемой за счет ВИЭ, упала на 30-80% последние 10 лет;
- Реализация кластерного подхода и осуществление совместных КП разных секторов на базе уже имеющейся инфраструктуры;
- Полезное использование улавливаемого CO₂ в химической промышленности, при производстве строительных материалов и пр.

В РФ комплекс проблем, сдерживающий развитие климатических проектов на основе природных экосистем, может быть решен за счет инфраструктуры и ресурсов сети карбоновых полигонов. Потенциал природных климатических решений будет раскрываться по мере повышения требований по сокращению выбросов парниковых газов и достижению углеродной нейтральности в качестве необходимых условий для экономического роста. В связи с незрелостью технологий декарбонизации производственно-технологических процессов углеродоемких секторов экономики, а также сохранением доли ископаемых видов топлива в мировом энергобалансе, актуальность климатических проектов на основе природных экосистем в перспективе будет возрастать. И карбоновые полигоны будут играть ведущую роль для пилотирования и реализации

природных климатических проектов, которым, напомним еще раз, придается особое значение в достижении целей СНУР 2050.

11.2 Разработка финансовых моделей инвестиционных проектов карбоновых ферм с использованием разных технологий наиболее актуальных для Северо-Западного региона и обоснование экономической эффективности реализации приоритетных природных климатических проектов

Результативность обязательного и тем более добровольного участия компаний в реализации климатических проектов (КП) практически в любом секторе экономики в значительной степени зависит от наличия у компаний реальной заинтересованности в сокращении выбросов парниковых газов. Этим определяется целесообразность более тщательно изучить организационно-экономические механизмы, повышающие вовлеченность компаний в климатические инициативы. В рыночных секторах экономики такую роль может играть конкуренция, если снижение углеродного следа, например, посредством соответствующего регулирования, становится одним из значимых факторов конкурентоспособности компаний. Естественно-монопольные сектора в данном случае требуют особого подхода, так как функционирующие там компании в существенно меньшей мере по сравнению со свободным рынком испытывают конкурентное давления. Российский рынок теплоснабжения, из-за своей специфики и обслуживающей его инфраструктуры, более склонен к сохранению статуса естественной монополии. Схема регулирования деятельности монополии, при которой согласуются интересы всех трех сторон, а именно потребителей, регулятора и энергетических компаний, способствует более эффективному функционированию рынка теплоснабжения (Рисунок 92) [363].

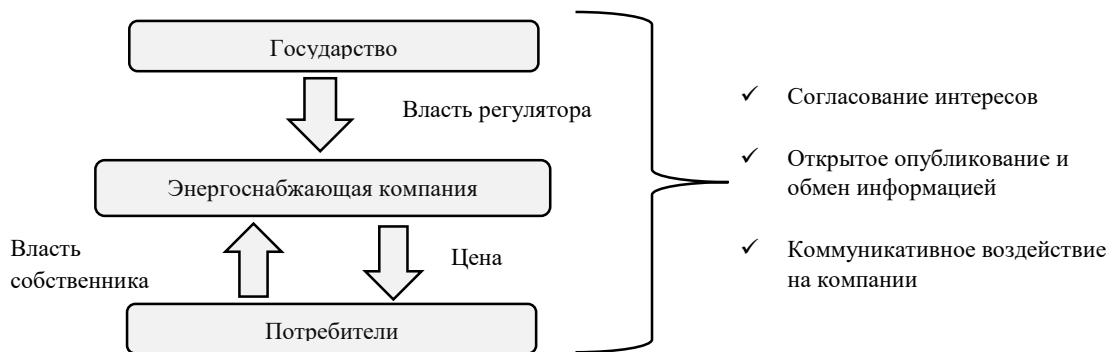


Рисунок 92 – Схема регулирования монополии, находящейся в собственности потребителей (Составлено авторами на основе [364])

Реализация подобного решения приводит к следующим результатам. Регулятор сохраняет свою заинтересованность, которая может носить, например, политический характер, в сдерживании или снижении цен на тепловую энергию для потребителей. В этом

же заинтересованы и потребители, и сама компания, непосредственно контролируемая ими. При таком согласовании интересов у компании нет стимулов завышать затраты и предоставлять неполную или недостоверную информацию регулятору. Возникает также возможность использования коммуникативной власти – давления на компаний, завышающие цены, с помощью политиков и СМИ. Кроме того, подобная схема способствует повышению доверия потребителей, что является немаловажным фактором в процессе реализации энергоперехода.

Для улучшения регулирования теплоснабжения в работе [363] предлагаются следующие, зарекомендовавшие себя в зарубежной практике, методы и механизмы, результативность которых для условий России может быть подтверждена экспериментально:

- Передача компаний в собственность потребителей или их представителей, что обеспечит согласование интересов сторон, возможно на условиях акционирования.
- Публичные слушания и коллективное принятие решений по проектам в сфере теплоснабжения с участием потребителей.
- Обязательная публикация данных о деятельности и ценообразовании, что обеспечит возможность сравнения между организациями.
- Создание местного органа власти для мониторинга ценообразования и обработки жалоб потребителей.

Следование этим рекомендациям может способствовать формированию институциональных рамок, обеспечивающих согласование интересов теплоснабжающих компаний, потребителей и регуляторов. Таким образом, результативное достижение национальных целей низкоуглеродного развития становится возможным не только посредством координации различных направлений государственной политики на федеральном и отраслевом уровне, но и за счет грамотной приоритизации способов декарбонизации экономики на региональном уровне. Преобразование энергосистемы должно учитывать такие особенности регионов, как структура и доступность первичных источников энергии, включая низкоуглеродные, температурный режим, плотность населения и другие. Потенциал результативного поглощения парниковых газов путем реализации климатических проектов на разных территориях складывается из ряда факторов, включая: (1) наличие и качество лесных массивов, а также потенциальных резервуаров для захоронения парниковых газов; (2) наличие заинтересованного экономического агента, обладающего существенными инвестиционными возможностями, или возможность привлечения таких агентов путем верификации полученных на

территории региона углеродных единиц; (3) бюджетная, нормативно-правовая и иная поддержка местных властей, снижающая барьеры для реализации климатических проектов.

11.3 Разработка рекомендаций по вопросам финансирования карбоновых ферм с учетом условий и особенностей финансовой модели углеродного регулирования в Российской Федерации, актуальных для Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Задачи данного этапа исследования заключались в уточнении и дополнении характеристики финансовой модели углеродного регулирования в РФ, а также в оценке вызовов и перспектив развития углеродного регулирования в РФ с акцентом на его финансовые детерминанты, в том числе обоснование финансовых решений по вопросам становления регионального углеродного рынка СПб и Ленинградской области. В исследовании учитывалось допущение о том, что чрезмерно мягкая финансовая модель углеродного регулирования создает риски, связанные с импортом экологических проблем из других стран, внедривших более жесткое углеродное регулирование, а также формирует предпосылки к эффекту «зеленого парадокса». Для оценки российской модели в этом отношении был введен индекс жесткости.

В жесткий периметр углеродного регулирования входят организации с существенным объемом выбросов ПГ. На национальном уровне, согласно ст. 7 Федерального закона от 02.07.2021 №296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», с 2025 г. предельный объем выбросов для целей углеродного регулирования составит не менее 50 т СО₂-е. Сведения об учтенных выбросах парниковых газов по регулируемым производственным процессам и видам деятельности за 2022 г. представлены на Рисунке 93.

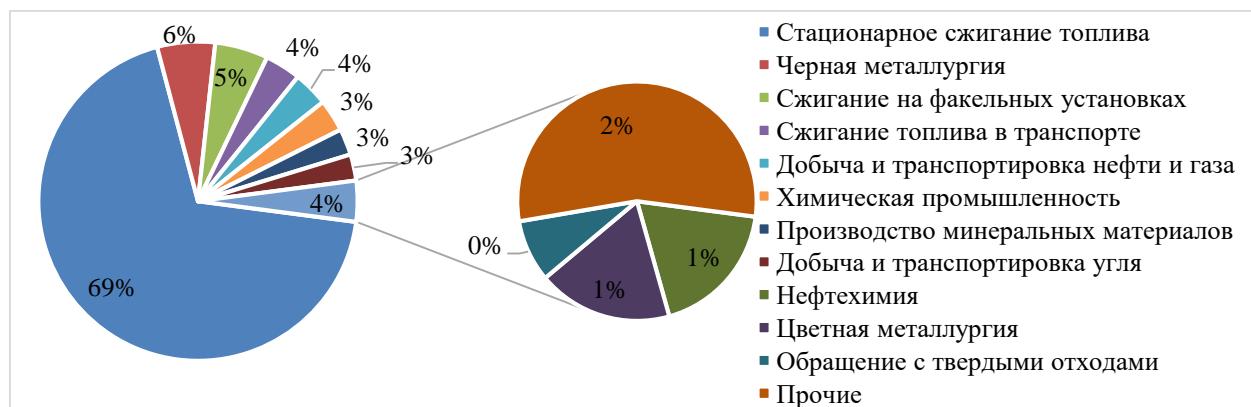


Рисунок 93 – Структура выбросов парниковых газов по данным углеродной отчетности регулируемых организаций Российской Федерации за 2022 г.%

Углеродная отчетность регулируемых организаций по итогам первой отчетной кампании в 2023 г. охватывает около 57% инвентаризованных выбросов парниковых газов в Российской Федерации. В периметр финансовой модели углеродного регулирования на национальном уровне поэтапно будет вовлекаться все больше организаций из разных отраслей. Прогнозируется, что число углеродных отчетов за 2025 г. составит 21 800, более чем в 20 раз превысив аналогичный показатель за 2022 г.

Мягкий периметр углеродного регулирования в России распространяется на компании, которые реализуют добровольные климатические проекты. Основную заинтересованность в этом отношении демонстрируют крупные отечественные компании, осуществляющие экспортную деятельность. Так, в период с 2019 по 2022 г. данные компании приобрели свыше 700 тыс. УЕ. В условиях затруднения доступа российского бизнеса к ведущим международным углеродным рынкам есть основания ожидать, что спрос данных компаний будет переориентирован на результаты национальных климатических проектов [365].

Конъюнктура развития углеродного рынка в России неблагоприятна. Ключевые вызовы в этой области можно подразделить на внешние, связанные с позициями российских климатических проектов на международных рынках, и внутренние, включая вызовы странового, корпоративного и проектного уровня. Гипотеза исследования в рамках поставленной проблемы заключалась в том, что на ранних этапах развития финансовая модель углеродного регулирования в РФ является мягкой, обеспечивая скорее сигнальный эффект для бизнеса и не оказывая значимого влияния на выполнение национальных целей по достижению углеродной нейтральности. Для проверки гипотезы введен *индекс жесткости финансовой модели углеродного регулирования*. Оценка индекса жесткости финансовой модели углеродного регулирования в России представлена в Таблице 47.

Таблица 47 – Оценка индекса жесткости финансовой модели углеродного регулирования в Российской Федерации

№	Направление оценки	Характеристика модели	Баллы
1	Обязательный сегмент (национальный уровень)	Отсутствует	0
2	Обязательные сегменты (региональный уровень)	Обязательные требования применяются в единичных случаях	0,5
3	Регулируемая хозяйственная деятельность и производственные процессы (обязательные требования)	Хозяйственная деятельность и производственные процессы крупнейших эмитентов ПГ	0,5
4	Используемый инструментарий (обязательный сегмент)	Система торговли у. е., основанная на принципе «базовый уровень и кредит» (региональный уровень)	0

№	Направление оценки	Характеристика модели	Баллы
5	Интеграция обязательных и добровольных условий углеродного регулирования	Результаты добровольных климатических проектов принимаются в зачет выполнения обязательных требований без ограничений	0
6	Интеграция в систему международного углеродного регулирования	Отсутствует	0
7	Климатическая отчетность	Требования к обязательному составлению и представлению распространяются на крупнейших эмитентов ПГ	0,5
Сумма баллов			1,5

Источник: [366].

Оценка индекса жесткости финансовой модели углеродного регулирования в РФ подтверждает выдвинутую гипотезу. На текущем этапе развития данная модель характеризуется весьма мягкими требованиями, что создает предпосылки к эффекту зеленого парадокса. Актуальным остается и риск импорта экологических проблем из других стран.

Методика обоснования финансовых решений по вопросам обеспечения регионального углеродного рынка (далее – методика) представлена в статье [367]. Финансовые решения рассматриваются нами в широком смысле, включая не только решения в области финансового посредничества, финансового риск-менеджмента и трансформации ликвидности, но и по вопросам вспомогательной финансовой деятельности (информационной, экспертной, регуляторной). Обоснование решений по развитию инфраструктуры углеродного рынка в Регионе исходит из предпосылки о том, что основные институты в этом секторе включают: а) организации, оказывающие услуги по сопровождению климатических инициатив (дизайн, валидация, верификация, регистрация климатических проектов); б) профильные секторы фондовой биржи и связанные вспомогательные институты (брокеры, дилеры, депозитарии и др.); в) регуляторов рынка (профильные государственные ведомства); г) карбоновые полигоны и фермы. На фоне активного развития вспомогательных услуг в исследуемой сфере актуальна проблема информационно-аналитической поддержки участников углеродного рынка.

Значимость карбоновых полигонов и ферм для развития углеродного рынка определена тем, что результаты их работы необходимы для корректного обоснования выбора инструментов углеродного регулирования. В свою очередь востребована стоимостная оценка затрат, связанных с загрязнением воздуха, позволяющая осуществлять контроль за регулируемыми организациями с применением понятных для пользователей информации (законодателей, регуляторов, бизнеса, общества) единиц измерения

связанного ущерба и прогресса по его снижению. В целях развития углеродного рынка Санкт-Петербурга и Ленинградской области представляется целесообразным развивать тестирование технологий реализации климатических проектов на базе проектируемого карбонового полигона «Ладога», являющемся действующей площадкой для проведения фундаментальных и прикладных климатических исследований [368, 369].

Условия развития углеродного рынка в Санкт-Петербурге и Ленинградской области оцениваются как сравнительно благоприятные. Апробация методики обоснования финансовых решений по развитию регионального углеродного рынка показала, что приоритетное внимание в этом отношении необходимо уделить информационно-аналитической поддержке участников рынка, становлению его биржевого сегмента, внедрению системы финансовой поддержки декарбонизации бизнеса. Аргументировано, что финансовая оценка эффектов декарбонизации повысит информационную прозрачность рынка, способствуя преодолению проблемы недоверия к вопросам климатической повестки со стороны частного сектора. Обоснование параметров государственной поддержки декарбонизации бизнеса требует дальнейших исследований, в том числе по вопросу разработки рекомендаций по вопросам финансирования карбоновых ферм с учетом условий и особенностей российской финансовой модели углеродного регулирования, актуальных для Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

12 Систематизация технологий природных климатических проектов на основе лесных, сельскохозяйственных и морских экосистем по поглощению и предотвращению эмиссии парниковых газов и их приоритизация с точки зрения целесообразности реализации в Северо-Западном регионе

В последнее время в свете уточнения тенденций, оказывающих влияние на развитие мировой энергетики и отраженных в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года [370], а также принимая во внимание провал политизированной зеленой политики, вызвавшей энергетический кризис в ЕС и ослабившей ее конкурентоспособность в дополнении к радикальным изменениям в климатической повестке в США, как и к долгосрочным планам по энергопереходу у основных внешнеторговых партнеров нашей страны, происходит переосмысление традиционных постулатов энергоперехода. Ряд экспертов ставят под сомнение реализуемость заявленных ранее целей постепенного увеличения доли ВИЭ в мировом энергетическом балансе с доведением ее до 60 % и более, в том числе ввиду их несовместимости с фундаментальными законами термодинамики и с необходимостью обеспечения к середине текущего столетия энергопотребления для 10 млрд. человек [371]. Также обращается внимание на ресурсные

ограничения по редкоземельным и другим критическим материалам, на монополизацию производства оборудования для солнечной фотоэлектрической энергетики [372], нестабильный характер выработки энергии на базе ветряных и солнечных установок с учётом изменчивости погодных условий [373], как и на отсутствие экономически и экологически эффективных способов утилизации элементов солнечных батарей и лопастей ветряков в конце срока их службы. Вместе с тем, как указывают данные актуального Отчета по энергетике МЭС, в 2024 году глобальное потребление электроэнергии продолжало расти, превысив более чем вдвое средние показатели роста, которые были характерны для прошедшего десятилетия. Умеренный рост энергопотребления предполагается и в предстоящие десятилетия [374]. В этих условиях подвергаются сомнению не только ряд устоявшихся приоритетов энергоперехода, но и активизируется поиск новых технологических решений и других инноваций при их одновременной оценке с позиции удовлетворения возрастающих потребностей в энергетических ресурсах, энергетической безопасности и задач декарбонизации.

В данном контексте среди приоритетов энергетической политики все более заметное место стала занимать биоэнергетика как одно из направлений так называемой нетрадиционной возобновляемой энергетики, объединяющей в своем составе ветряную, солнечную, геотермальную, приливную энергетику и энергетику волн, а также получаемые из биомассы жидкое биотопливо и биометан. И если использование традиционных ВИЭ насчитывает многие тысячелетия, то взрывной рост нетрадиционной возобновляемой энергетики стал происходить лишь в текущем столетии. Так, общий выпуск энергии в ее рамках в 2022 г. достиг 363 млн т н.э. в пересчете по полезной энергии, что в 50 раз выше, чем в 2000-м году, при этом развитые страны, увеличившие выпуск нетрадиционной энергии более чем в 100 раз, обеспечивали в 2022 г. 2/3 от их мирового производства [365]. Что касается биотоплива в качестве одного из нетрадиционных ВИЭ, то под ним понимается твёрдое, жидкое или газообразное топливо, полученное из биомассы (наземной или водной углеродсодержащей материи).

Россия, обладая значительным потенциалом в области получения биомассы для производства биотоплива нового поколения, может занять лидирующие позиции на активно развивающемся мировом рынке биоэнергетики, в том числе в качестве поставщика инновационного оборудования и технологий, что позволит обеспечить стране диверсификацию экспортных доходов и долгосрочную конкурентоспособность в условиях четвертого энергоперехода. Отметим в этой связи одобрение 14 марта 2025 года комиссией по Научно-технологическому развитию РФ паспорта Национального проекта «Технологическое обеспечение биоэкономики», ключевыми целями которого являются

достижение страной в этой области к 2030 г. технологического суверенитета и лидерства в области биоэкономики к 2036 г. К первоочередным направлениям развития российской биоэкономики наряду с энергетикой относятся химическая и пищевая промышленность, медицина, сельское хозяйство и ряд других. Условием успешной реализации этого нацпроекта в части биоэнергетики служит наличие в Российской Федерации крупных массивов сельскохозяйственных, лесных и водных биоресурсов, что создает предпосылки для завоевания ею лидерских позиций на мировых рынках новых технологий биоэкономики [375]. Наряду с этим, в России уже налажено изготовление отечественного оборудования для производства и применения пеллет из древесины и древесных отходов, относящихся к биотопливу второго поколения.

Однако пока весь этот потенциал используется недостаточно, о чем, в частности, свидетельствует сложившаяся структура энергобаланса РФ. Более того, согласно целевому сценарию Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 г. (далее – Стратегия 2050), структура потребления первичной энергии не претерпит существенных изменений в сторону ее возобновляемых источников. Так, предполагается, что к 2050 г. доля ВИЭ составит 1,1%, гидроэнергии 5,3%, доля атомной энергии возрастет на 2,8% и составит 8,8%, доля угольной генерации останется на прежнем уровне 11,4%, доля нефти сократится до 26,4%, а газа возрастет до 46,9%. При этом общий объем потребления энергетических ресурсов вырастет почти на 23% и составит 1533,7 млн. т у. т. Соответствующая целевому сценарию Стратегии 2050 структура энергобаланса, будет обеспечена в том числе за счет переориентации на новые рынки дружественных стран, что позволит, как предполагается, увеличить экспорт газа в три раза, а угля в 1,7 раза. Обратим внимание, что даже в разработанном в этой связи сценарии ускоренного энергоперехода предполагается рост объемов экспорта угля с 212,5 млн т в 2023 г. до 264 млн т в 2050 г. при одновременном росте внутреннего потребления первичной энергии на основе ВИЭ до 19 млн. т у. т, (т.е. с учетом низкой текущей базы в шесть раз), и при сокращении доли угля и нефти на 25%.

Ключевые показатели, зафиксированные в рамках целевого сценария, так и сценария ускоренного энергетического перехода, в настоящее время более детально прорабатываются при подготовке Федерального проекта Плана мероприятий по реализации Стратегии 2050. При этом важно принимать во внимание риски ввиду падения мирового потребления угля под воздействием климатических императивов и развития углеродонейтральных источников энергии [376], а также прогнозные оценки на 2050 г. структурных характеристик энергетических балансов основных внешнеторговых партнеров России и перспективы введения ими углеродного регулирования [377, 378]. Учет этих факторов

обуславливает целесообразность более существенной диверсификации структуры энергетического баланса страны, в том числе путем интенсификации усилий по развитию в стране биоэнергетики как инновационного направления возобновляемой энергетики. Биоэнергетика в качестве важного сектора биоэкономики, по образному выражению премьер-министра РФ М.В. Мишустина, находится на острие гонки технологий, там, где разворачивается наиболее напряженное соперничество за мировое лидерство [379]. Так, если в 2024 г. объем отечественного рынка биотехнологической продукции составил 440 млрд руб., то с учетом сырьевого потенциала России, серьезных заделов и конкурентных преимуществ, реализация планов, заложенных в национальном проекте по биоэкономике, позволит к 2030 году существенно сократить импортозависимость и обеспечить технологический суверенитет по ряду продуктовых направлений, а через 10 лет выйти в число технологических лидеров в этой области [379].

Биоэнергетика ныне находится в фазе активного роста и развивается по различным направлениям, включающим производство и использования биогаза, биоэтанола, биодизеля и биоугля и т.д. Среди этих направлений важно расставить приоритеты с учетом, с одной стороны, их экономической и экологической эффективности а, с другой – технологической и инфраструктурной готовности. К их числу относится такое актуальное и обладающее значительным потенциалом в области повышения энергоэффективности и секвестрации углерода направление биоэнергетики как использование морских экосистем для производства биотоплива третьего поколения из макроводорослей с одновременной реализацией на этой базе биоклиматических проектов [380]. Под биоклиматическим проектом авторами понимается разновидность природных климатических проектов по сокращению эмиссии или секвестрации климатически активных газов путем преобразования биомассы в низкоуглеродное возобновляемое биотопливо и другие продукты. Напомним в этой связи, что территория страны омывается морями Тихого, Атлантического и Северного Ледовитого океанов, а протяженность прибрежной зоны составляет 38,5 тыс. км, что дает большие возможности по получению биомассы водорослей. Так по всем российским бассейнам ученые рекомендуют вылов около 2 млн тонн водорослей в год, что на 60% превышает дикий промысел всего мира [381].

С учетом значительного потенциала, которым располагает Российская Федерация в области получения биомассы водорослей и реализации климатических проектов на основе морских экосистем, а также принимая во внимание многочисленные исследования, подтверждающие преимущества использования макроводорослей для производства биотоплива при значительном разбросе оценок коммерческой целесообразности таких проектов [382], целью статьи является оценка потенциала производства биотоплива

третьего поколения на основе морских экосистем для диверсификации энергетического баланса РФ в условиях развития мирового рынка биоэнергетики. Задачами исследования являлись: изучение мирового рынка биоэнергетики с обоснованием целесообразности ускоренного развития производства биотоплива третьего поколения в России при параллельной реализации природных климатических проектов на основе морских экосистем; анализ альтернативных способов получения биомассы и производства биотоплива третьего поколения; оценка экономической эффективности и приоритизация проектов создания морских карбоновых ферм и сбора штормовых выбросов для производства биотоплива с выработкой рекомендаций по их развитию в РФ.

Для решения указанных задач использовались институциональный и отраслевой конкурентный анализ, методы финансового моделирования инвестиционных проектов для оценки экономической эффективности альтернативных способов получения биомассы и технологий для производства биотоплива, а также климатических проектов на основе макроводорослей. Анализ научных исследований, в том числе на базе данных Web of Science и Scopus был дополнен статистическими и практическими данными о проектах по производству биотоплива и секвестрации углерода водорослями, опубликованных на платформах STATISTA, CORDIS, CARBONPLATFORM, National Academy of Sciences (Ocean-Based Carbon Dioxide Removal), IEA, IRENA.

Биоэнергетика в условиях перехода к третьему инновационному поколению на основе морских экосистем

В 2024 году мировой спрос на энергию вырос на 2,2%, что в том числе обусловлено экстремальными погодными условиями. При этом на ВИЭ и природный газ пришлась наибольшая доля прироста общего объема энергоснабжения 38% и 28% соответственно [383], однако по оценкам МЭС для достижения углеродной нейтральности к 2050 году среднегодовой рост производства и потребления биотоплива должен составлять 11%. Для декарбонизации углеродоемких секторов биотопливо будет использоваться в авиации и автотранспорте, для выработки электроэнергии, в целлюлозно-бумажной, пищевой и горнодобывающей отраслях [384]. В настоящее время на биоэнергетику приходится около 9% мирового производства энергии [385]. В 2024 г. объем рынка биотоплива оценивался в 1,89 млн баррелей нефтяного эквивалента в день, и к 2030 г. прогнозируется рост до 2,44 млн [386]. При этом для сокращения экологических и социальных рисков, обусловленных, в частности, повышением цен на кукурузу и другие продовольственные товары, масштабной вырубкой деревьев и эрозией почвы и проч., ученые и практики находят новые виды сырья для производства биотоплива, относящиеся к третьему поколению.

Биоэнергия производится из органического материала растений и является важным компонентом энергетического перехода, поскольку она базируется на возобновляемых ресурсах и для нее характерен низкий уровень эмиссии ПГ. К числу ключевых преимуществ биоэнергии также относятся гибкость, широкая сфера применения и возможность использования для ее масштабирования существующей нефтегазовой инфраструктуры при частичной модернизации.

Благодаря значительным преимуществам биоэнергетических ресурсов на их долю в мире приходится 55% всей возобновляемой энергии, без учёта традиционного использования биомассы [387]. Более 80 стран реализуют долгосрочные стратегии развития биоэнергетики. Китай, Канада и США уже в 2021 г. объявили о существенных инвестициях в исследования и разработки для последующего масштабирования биотоплива, Индия с 2022 г. расширяет программу производства биомассы для развития биоэнергетики. В ноябре 2023 г. в этой стране было объявлено об обязательном использовании биогаза в объеме 1% от всех источников энергии с увеличением до 5% к 2028 г., а Бразилия с 2022 г. реализует меры поддержки производства биогаза. Все это обуславливает прогнозируемый мировой рост спроса на биоэнергию на 30% до 2030 [388]. В таких странах как Бразилия, Финляндия, Дания и Швеция доля биоэнергии составляет около 30% в структуре энергобаланса, в Китае, Индии, Японии, Корее – около 5% [389]. В настоящее время к числу лидеров по производству биотоплива относятся Северная и Южная Америка с долей в структуре мирового производства, составляющей соответственно, в 40% и 25%.

В Российской Федерации биоэнергетическая мощность в 2023 году, по оценкам исследовательского отдела Statista, составила 1,37 гигаватт [390], т.е. 0,00012% от всей вырабатываемой энергии страны, при этом значительная часть ее приходилась на упомянутое выше биотопливо второго поколения – пеллеты из древесины и древесных отходов. Данная структурная особенность энергетического баланса в нашей стране была связана, в том числе, с преимущественной ориентацией производства пеллет и топливных брикетов на экспорт, на долю которого до обострения геополитической ситуации из производимых 2,3 млн тонн пеллет приходилось 95%. Последовавшие санкционные ограничения привели к сокращению их производства в 2024 г. почти на 50% по отношению к 2021 г. Переориентация пеллетной промышленности на рынки Китая осложнена запретом на ввоз в страну отходов, к числу которых относятся и пеллеты. Что касается внутреннего рынка, то этот дорогостоящий вид топлива пока неконкурентоспособен по цене с углем и газом. Вместе с тем введение углеродного налогообложения и другие меры могут повысить конкурентоспособность биотоплива второго поколения [391].

Принимая во внимание текущие сложности на российском рынке биотоплива второго поколения и существенный потенциал, которым располагает изготовление биомассы на основе морских экосистем, возрастает значение развития биотоплива третьего поколения на основе микро- и макроводорослей, на которое уже направлено основное внимание исследователей и бизнес-структур во многих странах мира. Об этом свидетельствует рост публикаций по соответствующей тематике, число которых за последнее десятилетие составило 424 шт., а также инвестиционных вложений в проекты с общим объемом более нескольких млрд долл [392] (Таблица 48).

Таблица 48. Классификация видов биотоплива по типу используемого в производстве сырья

Виды биотоплива	Тип используемого сырья	Себестоимость энергии, долл. США/ГДЖ	Ограничения и риски
Первое поколение	Сельскохозяйственные культуры: сахарный тростник, кукуруза, пшеница, рапсовое, соевое, кокосовое масла	21.2-35.4	Для производства сырья необходимы пахотные земли, питьевая вода, удобрения в результате наблюдается конкуренция с производством продуктов питания и кормов, что провоцирует рост цен на продукцию АПК
Второе поколение	Целлюлозные материалы: жмых, солома, древесина, травяные волокна; органические отходы	37.7-56.6	Высокое содержание лигнина, необходимость сложных процессов делигнификации сопряжена с ростом операционных затрат. Экологические риски в результате вырубки лесов в качестве ключевого источника сырья.
Третье поколение	Микроорганизмы, макро- и микроводоросли	34.3-57.1	Сезонная доступность биомассы, затраты на хранение сырья, высокие операционные затраты на предварительную обработку сырья для устранения сложных полисахаридных структур при применении некоторых технологий, возможно эвтрофикация морской среды

Источник: составлено авторами на основе [393, 394].

Морские водоросли обладают несколькими важными свойствами: во-первых, для них характерен быстрый рост и значительный объем биомассы, которая может быть использована в качестве сырья для биотоплива [395]; во-вторых, их отличают относительно низкие операционные затраты на производство биотоплива из макроводорослей в сравнении с наземной биомассой второго поколения, а также отсутствие серьезных социальных рисков в отличие от получения сырья первого поколения (Таблица 45); в-третьих, они обеспечивают значительные объемы секвестрации CO₂. Согласно имеющимся оценкам, макроводоросли могут поглощать от 0,1732 до 0,55 Гт CO₂ ежегодно [396], что по объему соответствует трети выбросов ПГ в нашей стране. Поэтому выращивание макроводорослей для секвестрации CO₂ относится к числу приоритетных технологий для реализации климатических проектов [397].

Однако промышленные объекты по производству биотоплива из макроводорослей, а также природные климатические проекты по секвестрации CO₂ морскими экосистемами в РФ практически отсутствуют. В этой области ведутся лишь региональные исследования в Охотском, Белом, Баренцевом, Японском и Балтийском морях, а также в Азово-Черноморском бассейне. Кроме того, на стадии НИОКР находится проект компании Лукойл по разработке технологий утилизации климатически активных газов с помощью микроводорослей и их последующей переработки в биотопливо [398]. В этой связи актуальной задачей является оценка альтернативных возможностей получения биомассы для производства биотоплива третьего поколения и реализации природноклиматических проектов на основе морских экосистем РФ.

Сравнительная оценка способов получения биомассы и технологии реализации биоклиматических проектов на основе макроводорослей

Реализация климатических проектов на основе водорослей является перспективным направлением, однако в настоящее время такие проекты не инициированы российскими бизнес-структурами. Обзор реестра углеродных единиц РФ указывает на регистрацию (на 03.04.2025) 54 проектов, среди которых на природные решения приходится лишь 6. Остальные проекты являются технологическими, и половина из них направлена на повышение энергоэффективности [399]. Фокусировка бизнеса на проектах по повышению энергоэффективности связана с рядом факторов. Во-первых, текущий потенциал по оптимизации энергозатрат в РФ не исчерпан [400], во-вторых, при повышении энергоэффективности помимо климатических эффектов предприятие получает прямые экономические выгоды в краткосрочной и среднесрочной перспективе без существенного изменения производственно-технологических процессов [401]. Природные климатические проекты реализуются в меньшей степени, поскольку экономические эффекты природных

решений зачастую неопределенны из-за длительного проектного периода, неустойчивости природно-климатических условий, изменчивости и низкого уровня цен на углеродные единицы, а также сложности оценки сопутствующих значимых экосистемных эффектов и учета региональной специфики углеродного баланса [402]. Климатические проекты относятся к инвестиционным проектам, которые могут обладать существенными экосистемными эффектами. Поэтому для оценки и выбора приоритетного из альтернативных вариантов реализации проекта применим классический методом финансового моделирования чистой приведенной стоимости (NPV), поскольку для принятия решений бизнесом о реализации проекта на первый план выходит возможность получения дохода. Если при реализации проекта возникают дополнительные социальные или экологические эффекты, то метод дополняется качественным анализом, в том числе для обоснования привлечения финансирования со стороны государства. Для оценки экономической эффективности биоклиматических проектов на основе макроводорослей анализ современных практик и исследований позволил выделить три альтернативных способа получения биомассы:

1. Организация морской карбоновой фермы для выращивания макроводорослей для секвестрации CO₂ с последующим захоронением биомассы в глубоководных слоях океана. Данный тип проекта, по оценкам экспертов, экономически нецелесообразен ввиду высокой себестоимости углеродной единицы при применении данной технологии 480 долл. за тонну CO₂ и при цене ее продажи не более 100 долл. Наряду с этим, для масштабирования фермы с целью оптимизации затрат потребуется увеличение площади выращивания, что сопряжено с рисками для естественной среды обитания морских живых организмов. Ввиду указанных недостатков данный тип проекта исключен из последующего анализа.

2. Сбор штормовых выбросов для переработки и получения биотоплива. В результате волн и приливов на побережья выбрасывается биомасса морских водорослей, которая на отдельных территориях накапливается в значительных объемах, создавая социальные неудобства из-за загрязнения зон отдыха, а также усугубляет негативные климатические эффекты в результате процессов гниения, эмитируя от 1,31 до 19,04 Гт CO₂/год [403]. В РФ есть территории, где штормовые выбросы являются экологической и социальной проблемой, решением которой в первую очередь занимаются муниципалитеты путем выделения финансирования на очистку рекреационных зон [404]. Вместе с тем традиционные затраты на очистку пляжей от разлагающихся водорослей можно компенсировать за счет реализации климатического проекта по предотвращению выбросов ПГ и переработке штормовых выбросов в биотопливо.

3. Создание морской карбоновой фермы для выращивания макроводорослей с целью секвестрации CO₂ и последующим сбором для переработки и получения биотоплива и проч. вариантов коммерческого использования биомассы. Помимо искусственно созданной фермы по выращиванию, в ряде регионов возможен дикий сбор водорослей из моря. В РФ есть потенциал для реализации таких проектов, поэтому экономическая эффективность будет играть первоочередную роль при принятии решения о создании морской карбоновой фермы или сборе дикорастущих водорослей для получения необходимой биомассы. Такой тип проекта оценивается авторами в качестве альтернативы или дополнения к проекту сбора штормовых выбросов с последующей их переработкой в биотопливо.

Переработка биомассы водорослей может осуществляться разными технологическими способами, в результате которых получаются различные виды биотоплива, тепло и энергия (Рисунок 94).



Рисунок 94 – Способы получения биотоплива третьего поколения [Составлено авторами]

Как показывает предварительный анализ именно гидротермальное ожигание является наиболее перспективной и приоритетной технологией производства биотоплива на основе водорослей. К этому выводу приходят и российские ученые в рамках проводимого исследования по поиску лучших катализаторов для развития технологии и повышения ее эффективности [405]. Таким образом, для дальнейшей экономической оценки в качестве приоритетной будем считать данную технологию. Что касается получаемого продукта, то наиболее целесообразно производство гидроугля и биомасла, в связи с технологической готовностью к масштабированию производства и доступной инфраструктурой хранения и транспортировки (Таблица 49).

Таблица 49. Сравнительная характеристика видов биотоплива

Вид биотоплива	Рыночная цена	Преимущества	Ограничения	Способ производства
Биоуголь (биочар)	30-70 тыс. руб./т	Минимальные энергетические затраты для производства; Изученная технология производства; Не требуется сложной инфраструктуры для хранения и транспортировки; Возможно использование в АПК в качестве удобрения или кормовой добавки.	Цена продажи ниже других видов биотоплива; Низкий выход готового продукта (20-40% от биомассы водорослей).	Гидротермальная карбонизация, температура от 180 до 260°C, давление 2–6 Мпа
Биомасло (биодизель, биокеросин)	100-120 тыс. руб./т	Не требуется сложной инфраструктуры для хранения и транспортировки; Высокий выход продукта в % (40-88%).	Средние энергетические затраты.	Гидротермальная карбонизация, газификация, температура 70 до 370°C, давление 1,5–25 Мпа
Биогаз (биометан, биоводород)	14 000-12 000 евро/т Данные для РФ отсутствуют	Самая высокая цена продажи из всех видов биотоплива	Сложная инфраструктура хранения и транспортировки; Низкий выход продукта менее 20% на тонну водорослей.	Гидротермальная карбонизация, окисление, образование метана, температура 20–700°C, давление 4-25 Мпа

Источник: составлено авторами на основе: [406].

Средний объем выброшенной биомассы водорослей на прибрежных зонах по всему миру значительно варьируется: от 0,1 до 325 кг на m^{-2} [407]. Волны, приливы, течения и штормы являются главными факторами, влияющими на объем штормовых выбросов. Кроме того, происходит изменение морских экосистем под влиянием климата, что в свою очередь влияет на рост водорослей и их миграцию. Все эти факторы осложняют прогнозы объемов штормовых выбросов. Российские исследования по объему штормовых выбросов представлены в нескольких работах для территорий Азовского моря – до 100 тыс. тонн на конец XX века, в последние годы измерения не проводились; Белого и Баренцева

морей – 100 тыс. тонн, зоны скопления рассредоточены; Балтийского моря – стабильная биомасса отсутствует, т.к. выбросы смываются обратно в море; заливов Петра Великого – 1-5 тыс. тонн и Анива – минимальная оценка 8,5 тыс. тонн.

Несмотря на то, что штормовые выбросы не прогнозируются во времени, пространстве и масштабности, и их распределение как правило варьируется, существуют территории, например, залив Анива, которые обладают устойчивостью штормовых выбросов. Для данной территории объем составляет 8,5 тыс. тонн биомассы в год, это максимальный объем, сконцентрированный на транспортно-доступном участке, при этом оценка приведена по минимальной границе. Росрыболовство на Сахалине и Курилах рекомендует добывать свыше 112 тысяч тонн макроводорослей, что будет способствовать устойчивому потоку сырья в случае отсутствия штормовых выбросов для производства биотоплива [408]. Также в заливе Анива возможна организация фермы по выращиванию водорослей, уже имеется положительный опыт по выращиванию и добыче 400-500 т биомассы ежегодно. Дополнительным фактором выбора участка реализации биоклиматического проекта выступает проводимый Сахалинский эксперимент по достижению регионом углеродной нейтральности, который осуществляется до 2028 года с целью трансляции опыта на другие регионы РФ. Поэтому потенциальными инвесторами создания морских карбоновых ферм могут стать предприятия с выбросами ПГ выше 50 000 тонн СО₂-е, среди которых с эмиссией более 150 тыс. тонн СО₂-е компании «Сахалинская энергия», «Эксон Нефтегаз Лимитед», «Восточная горнорудная компания», «Сахэнерго», «Охинская ТЭЦ», «НГЭС».

Оценка экономической эффективности и приоритизация различных вариантов реализации биоклиматических проектов на основе морских экосистем

С учетом возможных ограничений получения биомассы, например, в случае низких штормовых выбросов, функционирование предприятия по производству биотоплива может быть осложнено, что в свою очередь негативно отразится на экономической целесообразности реализации проекта. Поэтому моделирование NPV проводится с учетом возможности комбинирования способов получения биомассы до максимальной мощности производства, которая установлена на уровне 10 тыс. тонн перерабатываемой биомассы в год, так как минимальная оценка штормовых выбросов составляет 8,5 тыс. тонн и эта величина, которая рекомендуется для сбора и переработки в целях сокращения негативного экологического эффекта в результате разложения водорослей.

Результаты моделирования экономической эффективности реализации проекта демонстрируют существенные различия в зависимости от способа получения биомассы, а также от конечного продукта (Таблица 50). Так, каждый из способов получения биомассы

будет нецелесообразен при производстве только биоугля, так как это продукт с низкой долей выхода конечного продукта от объема биомассы, а также низкой ценой, которая не покрывает операционные затраты по производству биотоплива.

Таблица 50. Результаты оценки экономической эффективности инвестиционного проекта по производству биотоплива из водорослей при применении альтернативных способов получения биомассы

Тип проекта	NPV, млн. руб.	Срок окупаемости дисконтированный, год	PI	IRR, %
Штормовые выбросы → биоуголь	- 550,520 ₽	-	- 0,23	-
Штормовые выбросы → биомасло	81,651 ₽	6	1,18	27%
Дикий промысел → биоуголь	-338,795 ₽	-	0,13	-
Дикий промысел → биомасло	739,888 ₽	3	2	69%
Выращивание водорослей → биоуголь	- 55,067 ₽	-	0,24	-
Выращивание водорослей → биомасло	13,653 ₽	7	1,19	28%
Штормовые выбросы и дикий промысел → биомасло	177,729 ₽	6	1,37	35%
Штормовые выбросы и выращивание водорослей → биомасло	99,358 ₽	7	1,19	28%

С экономической точки зрения, наиболее приоритетным способом является сбор дикорастущих водорослей и производство их в биомасло. Однако если муниципалитет компенсирует операционные и инвестиционные затраты на сбор штормовых выбросов, а затраты на производство биомасла останутся на компании-производителе биотоплива, то проекты по производству биотоплива из штормовых выбросов и собранных дикорастущих водорослей станут приблизительно равноценны по экономической целесообразности. При этом существенным экосистемным эффектом будет обладать проект по сбору и переработке штормовых выбросов. Но в связи с тем, что объем штормовых выбросов нестабилен, может произойти остановка производства, поэтому для нивелирования рисков целесообразно развитие проекта по сбору и переработке штормовых выбросов совместно с диким промыслом для обеспечения стабильного потока сырья. Данный проект с учетом экономической оценки, существенных экологических и социальных эффектов может быть рекомендован к реализации, при этом государственное софинансирование в части сбора штормовых выбросов обеспечит повышение экономической целесообразности.

Проведенный финансово-экономический анализ демонстрирует положительные экономические эффекты по производству биомасла на основе дикорастущих водорослей и их штормовых выбросов. При этом масштабирование технологий производства биотоплива третьего поколения, рост цен на углеродные единицы в результате ужесточения климатической политики создадут более прочную экономическую основу для развития биоэнергетики и реализации климатических проектов на основе водорослей. Развитие этого направления в России требует комплексного подхода, который основан на реализации следующих мер:

1. Научные исследования и разработки эффективных методов культивирования водорослей, оптимизации процессов переработки для сокращения себестоимости, в том числе с позиции повышения энергоэффективности процессов получения биотоплива;
2. Государственная поддержка для масштабирования и коммерциализации технологий производства биотоплива третьего поколения в части предоставления налоговых льгот и субсидий предприятиям. Государственное софинансирование переработки штормовых выбросов в биотопливо путем перераспределения бюджета для уборки пляжей и захоронения макроводорослей на сбор штормовых выбросов с последующим производством биомасла;
3. Развитие международного сотрудничества для трансляции лучших практик производства биотоплива, привлечения инвестиций, создания производственной и логистической инфраструктуры с целью последующего экспорта и проч.;
4. Формирование нормативно-правовых основ справедливого энергоперехода, в том числе системы отраслевых стандартов производства биотоплива третьего поколения и разработки методологий климатических проектов на основе морских экосистем;
5. Развитие внутреннего рынка сбыта биотоплива третьего поколения путем стимулирования спроса и введения обязательных норм смешивания биокомпонентов с традиционными видами топлива на основе ископаемых источников энергии.

Важнейшими задачами остаются увеличение масштабируемости энергетических систем на основе водорослей и удовлетворение растущего глобального спроса на энергию. Как показал проведенный анализ, Российская Федерация имеет существенный потенциал для развития биоэнергетики третьего поколения, реализация которого позволит диверсифицировать структуру российского энергобаланса в пользу возобновляемых источников и внесет вклад в развитие углеродонейтральной экономики.

Полученные результаты третьего этапа решают актуальную научную проблему комплексного анализа перспектив развития морской биоэнергетики на основе производства биотоплива третьего поколения из водорослей. При этом учитываются такие факторы, как

ограниченность ресурсной базы, стабильность поступления сырья в зависимости от региона и способов добычи, сопоставляются альтернативные технологические цепочки добычи, переработки сырья и производства различных видов биотоплив. Предложен инструментарий для комплексной экономической оценки соответствующих альтернатив и выбора наилучших в конкретных условиях. Актуальность этой проблемы усиливается тем, что, с одной стороны, биотоплива считаются одним из самых перспективных видов ВИЭ. С другой стороны, опыт производства биотоплив первого и второго рода (из сельхозсырья и из отходов) показал их ограниченный потенциал в решении энергетических проблем и высокие сопутствующие риски, сильные отрицательные внешние эффекты. Поэтому особой актуальностью обладает производство биотоплива третьего рода, из водорослей. Теоретическая значимость исследования состоит в постановке такой комплексной задачи и демонстрации подходов к ее решению. Практическая ценность состоит в необходимости учета положений данной работы при планировании и реализации соответствующих проектов, а также при оценке реализуемости энергетических и климатических стратегий и их корректировке в том числе на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

12.1 Разработка финансовых моделей инвестиционных проектов карбоновых ферм с использованием разных технологий наиболее актуальных для Северо-западного региона и обоснование экономической эффективности реализации приоритетных природных климатических проектов

Согласно целевому сценарию Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, нетто-выбросы климатически активных газов должны сократиться на 54% к 2030 году от уровня 1990 года, при этом большая часть запланированного сокращения должна быть достигнута за счет увеличения поглощающей способности природных экосистем. Поэтому природные климатические проекты, реализуемые карбоновыми фермами, обладают высокой значимостью в долгосрочной перспективе. Вместе с тем, текущая практика демонстрирует инертность бизнес-структур в реализации природных климатических проектов. Так, по состоянию на 8 декабря 2024 года из 20 зарегистрированных климатических проектов, лишь 4 связаны с природными экосистемами, остальные проекты имеют технологическую направленность. Низкая заинтересованность бизнеса в реализации природных климатических проектов связана с институциональной неопределенностью, климатическими рисками, плавающими оценками коммерческой эффективности проектов. В результате оценки экономической и углеродной эффективности проекта облесения опытного участка залежной земли, расположенной в Ленинградской области, выделены

факторы, способствующие повышению привлекательности таких проектов для бизнеса, а также барьеры, препятствующие широкому участию частного капитала в природных климатических проектах. В рамках исследования проведена проверка гипотезы о том, что достижение экономической эффективности природных климатических проектов зависит не только от особенностей природных условий конкретного участка и способности производить продукт, но и от финансово-экономических факторов, связанных со стоимостью используемых ресурсов и цены реализации производимого продукта в виде древесины с учетом рыночного спроса и институциональной среды регулирования углеродных единиц. Эффекты реализации природных климатических проектов на примере опытного участка облесения можно разделить на следующие группы. Во-первых, природные климатические проекты способны генерировать экономические эффекты, связанные с производством природного продукта. На оцениваемом участке планируется осуществить посадку деревьев, что в будущем приведет к получению древесины и реализации ее на рынке. С этой точки зрения анализируемый проект облесения следует рассматривать не как инвестиционный проект, а как долгосрочный процесс производства, эффективность которого во-многом зависит от уровня рисков, поскольку срок такого производственного процесса составляет сорок лет. Во-вторых, природные климатические проекты создают экологический эффект, который выражается в повышении биоразнообразия, улучшении качества окружающей среды (воды, воздуха, почвы), в повышении нетто-выбросов парниковых газов и др. В-третьих, возникают рекреационные эффекты природно-климатических проектов, которые выражаются в создании или улучшении рекреационных зон для местного населения. В этой связи проект облесения при условии свободного доступа к территории у местного населения способен сформировать место отдыха, наблюдения за природой. В-четвертых, природные климатические проекты могут стать источником доходов местного населения за счет сбора дикорастущих растений, выросших на участке облесения. Сбор грибов и ягод, лекарственных трав позволит не только заготовить продукты для собственных потребностей, но и получить дополнительный доход от сдачи собранного урожая на переработку. Таким образом, оценка эффективности природно-климатического проекта должна учитывать круг заинтересованных лиц и разнообразие возникающих эффектов.

Для оценки экономической эффективности облесения залежной земли в Ленинградской области было смоделировано несколько вариантов монокультурного облесения следующими породами деревьев: ольха черная, береза, ель, сосна [409]. Кроме того, смоделированы проекты смешанного облесения: береза/ель, сосна/ель. Использование карбонового калькулятора на портале <https://www.ecobase.earth/> позволило использовать

данные об объеме поглощения парниковых газов при посадке деревьев различных культур. Данные об объеме и динамике поглощения парниковых газов разными породами деревьев позволили оценить углеродную эффективность проекта облесения различными породами деревьев. Понятие углеродной эффективности позволяет оценить сопоставить количество поглощенного углерода со стоимостью затрат на облесение. Разные породы деревьев различаются плотностью посадки, поглощающей способностью, стоимостью саженцев, а также стоимостью, полученной в конце срока реализации проекта древесины. Отношение суммы поглощенного в течение всего срока реализации проекта углерода к дисконтированной стоимости саженцев, включая затраты на посадку позволил выделить наиболее углеродоэффективные породы. В результате отобран проект посадки черной ольхи, поскольку его углеродная эффективность, представляющая собой отношение объема поглощенного углерода к стоимости затрат на посадку, оказалась выше других вариантов. Поскольку объем поглощенного углерода влияет на суммарную стоимость углеродных кредитов, которые можно реализовать на российской углеродной бирже в течение всего срока реализации проекта, отбор наиболее углеродоэффективного проекта позволил провести анализ чувствительности экономической эффективности такого проекта. Целью было выявление факторов, оказывающих наиболее сильное влияние на показатель экономической эффективности проекта – чистую настоящую стоимость.

Стоимость саженцев, включая затраты на транспортировку и посадку, определена исходя из данных портала государственных закупок. Среди государственных закупок были закупки саженцев аналогичных деревьев. Недостающие данные по анализируемым породам деревьев рассчитаны исходя из рыночного соотношения стоимости саженцев различных пород и имеющихся в распоряжении данных о величине затрат на саженцы, транспортировку и посадку.

Исходные данные для сравнительного анализа представлены в Таблице 51.

Таблица 51. Исходные данные для сравнительного анализа углеродных проектов облесения территории

№ п/п	Порода деревьев под посадку	Стоимость саженца, включая затраты на транспортировку и посадку, руб./ед.	Количество саженцев к посадке на 1 га, ед.	Период ротации деревьев, лет
1	Береза	7800	200	40
2	Ольха черная	5600	200	40
3	Ель	11000	400	40

4	Сосна	7600	400	80
5	Береза+сосна	7800+7600	150+150	80
6	Береза+ель	7800+11000	150+150	40
7	Лиственница	4500	400	40

Для оценки экономической эффективности реализации природно-климатического проекта по облесению залежальных земель были выполнены следующие шаги:

1. Установлен пространственный масштаб и временной горизонт исследования. В качестве пространства была выбрана Ленинградская область с площадью земельного участка 1 га. Временной горизонт для реализации проекта - 40 лет.
2. Определены альтернативные варианты посадки деревьев.
3. Проведена сравнительная оценка затрат и выгод при реализации перечисленных в Таблице 52 вариантов облесения территории. Для этого рассчитана углеродная эффективность приведенных вариантов реализации проекта облесения. Оценка затрат основывалась на методологии оценки стоимости жизненного цикла (LCC), включающую капитальные затраты, операционные расходы, ликвидационные расходы и стоимость капитала. Выгоды от реализации проекта включают в себя выпуск углеродных единиц.
4. Проведен анализ чувствительности проекта по выделенным факторам, т.е. изменение NPV при изменении ключевых экономических параметров, среди которых ставка дисконтирования, стоимость одной углеродной единицы, стоимость саженцев (включая посадку), стоимость выращенной древесины.

Территория, для которой проводилась оценка экономической эффективности реализации проекта (Рисунок 95).

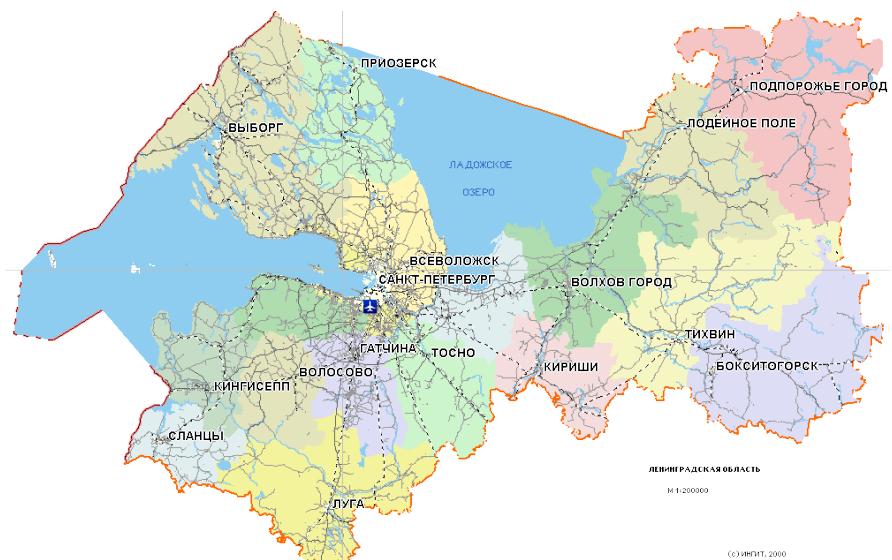


Рисунок 95 – Местоположение анализируемого участка

Местоположение участка – западные районы Ленинградской области (Кингисеппский, Сланцевский районы) (Рисунок 95). Северо-западный регион РФ относится, преимущественно, к подзоне южной тайги. Экосистемы данной природной зоны характеризуются повышенным регенерационным потенциалом в плане самовосстановления почв и растительных сообществ.

Оценка экономической эффективности разных вариантов реализации проекта облесения основана на дисконтировании денежных потоков разных типов. Первый тип денежных потоков связан с посадкой саженцев. Источником данных послужил портал государственных закупок, где были отобраны закупки, связанные с посадкой саженцев аналогичных пород деревьев, включающие в себя стоимость не только саженцев, но и работ по их посадке. Недостающие данные были пересчитаны исходя из соотношения рыночных цен на саженцы. Второй тип денежных потоков связан с реализацией углеродных единиц на углеродной бирже в России. Эти денежные потоки возникают в течение всего срока реализации проекта. Для их получения проект должен быть зарегистрирован как углеродный. Третий тип денежных потоков – выручка от продажи древесины в конце срока реализации проекта. Его прогнозирование связано как с рисками потери древесины в результате пожара и других стихийных бедствий, так и с высоким уровнем неопределенности долгосрочного проекта.

Оценка экономической эффективности проекта облесения территории ольхой черной с помощью метода чистой настоящей стоимости NPV, а также анализ чувствительности эффективности проекта от стоимости углеродных единиц, стоимости саженцев и стоимости древесины показал, что стоимость углеродной единицы оказывает наибольшее влияние (Таблица 52). Оценка минимально допустимой стоимости одной углеродной единицы говорит о том, что существующей в настоящее время стоимости в 700 рублей недостаточно. Минимально допустимая стоимость одной углеродной единицы в зафиксированных условиях о ставке дисконтирования, затратах на посадку и стоимости древесины составляет 3974 руб. при ставке дисконтирования 16,19 %.

Таблица 52. Углеродная эффективность проектов облесения

Порода деревьев под посадку	Период ротации деревьев, лет	Дисконтированная стоимость затрат на посадку, руб.	Суммарное количество углеродных единиц за срок реализации проекта	Количество углеродных единиц на 1000 рублей инвестиций, ед.
Ольха черная	40	677 599,12	7164	10,57
Береза	40	943 798,78	8089	8,57

Лиственница	40	1 160 865,16	7693	7,1
Береза/сосна	40	1 750 877,06	6256	3,84
Береза/ель	40	1 712 314,08	6477	3,78
Ель	40	2 647 447,77	6160	2,33
Сосна	40	1 829 145,73	3517	1,92

Ставка дисконтирования является существенным фактором экономической эффективности проекта. В настоящем исследовании ставка дисконтирования рассчитана на основе ключевой ставки Банка России с учетом премии за риск и исключения влияния инфляции. В результате расчетов определено минимальное значение ставки дисконтирования в размере 6 %, позволяющее избежать отрицательной эффективности (NPV равно нулю). Практически это может быть реализовано в случае использования бюджетного финансирования, а также полного или частичного субсидирования процентной ставки коммерческого банка экономическая эффективность проекта может стать значительно выше.

Следующим значимым фактором экономической эффективности проекта стала стоимость углеродной единицы. Применение в анализе текущей стоимости, равной 700 рублей, показало, что в текущих условиях эта стоимость не позволяет сделать природный климатический проект экономически эффективным. Международный опыт реализации проектов облесения с сертификацией на добровольных углеродных рынках, обобщенный в отчете Forest Trends' Ecosystem Marketplace [410], позволяет определить диапазон стоимости одной углеродной единицы. Так, в проектах лесного хозяйства и землепользования стоимость одной углеродной единицы составила 11,21 долл. США (Voluntary Carbon Market), причем за период с 2021 г. по 2023 г. стоимость одной углеродной единицы в проектах лесного хозяйства и землепользования выросла почти в два раза с 5,78 долл. США до 11,21 долл. США.

Проведенный анализ углеродной и экономической эффективности нуждается в дополнительных уточнениях. Так, например, ставка дисконтирования для реально реализуемого проекта должна быть уточнена с учетом структуры капитала конкретного инвестора и источника финансирования. Помимо этого, необходимо учесть нефинансовые выгоды и затраты. Важное значение для крупного бизнеса приобретает включение в систему корпоративного управления повестки ESG, которая свидетельствует о том, что компания заботится о работниках, природе и формировании прозрачных отношений с государством и обществом. Возможность выпуска зеленых облигаций для финансирования углеродного проекта может не только значительно снизить стоимость капитала, но и улучшить бренд компании. Методика оценки экономической эффективности углеродных

проектов, примененная в настоящей статье, с одной стороны, является общепринятой для оценки инвестиционных проектов, с другой стороны, нуждается в уточнении из-за наличия специфических характеристик, отличающих такие проекты от обычных инвестиций, в частности, из-за высокой роли общественных благ, возникающих в результате.

Дальнейшим направлением исследования должно стать разработка подходов и методов оценки неэкономической эффективности, связанной с получением экологического, углеродного, рекреационного и других возможных видов эффектов от реализации природных климатических проектов. Вывод об отрицательной экономической эффективности реализации природного климатического проекта облесения залежных земель в текущих экономических условиях означает необходимость поиска других групп заинтересованных лиц и оценки альтернативной эффективности проекта.

Опыт стран БРИКС в реализации агроклиматических проектов в целях достижения углеродной нейтральности

Накопленный в реализации климатических проектов опыт стран, входящих в объединение БРИКС, может стать стартом успешного распространения соответствующих технологий и методов управления климатическими проектами среди всех участников БРИКС+ и, в частности, в России. Исследование направлено на обобщение и систематизацию опыта реализации агроклиматических проектов ведущих стран БРИКС+, выявление возможностей и барьеров их распространения в рамках всего объединения стран, и в том числе, в России. Целью исследования является выявление характерных особенностей агроклиматических проектов, обобщение опыта стран БРИКС+ и определение перспектив и барьеров их развития в России. Несмотря на незначительный опыт реализации агроклиматических проектов в России, существуют возможности использования опыта стран БРИКС+ при осуществлении согласованной политики и формировании инфраструктуры эффективного распространения технологий и знаний.

Сущность и характерные особенности природных климатических, в частности, агроклиматических, проектов в настоящее время изучены не в полной мере. Так, агроклиматические проекты можно рассматривать в узком смысле и в широком смысле. В узком смысле агроклиматические проекты представляют собой проекты, направленные на снижение нетто-выбросов парниковых газов и реализуемые в сельском хозяйстве. В широком смысле агроклиматические проекты, помимо сельскохозяйственной сферы применения, добавляют сферу землепользования и изменения землепользования, а также лесное хозяйство. В итоге широкое рассмотрение агроклиматических проектов позволяет отнести к ним все климатические проекты, так или иначе связанные с использованием почвенных ресурсов.

Природные климатические проекты организуются на основании следующих принципов:

- Дополнительность. В результате природных климатических проектов происходит увеличение нетто-поглощения углерода по сравнению с определенной базовой линией.
- Финансовая дополнительность. Оплачиваются только дополнительные усилия по увеличению нетто-поглощения, которые не могли быть реализованы без дополнительного финансирования, привлекаемого в рамках проекта.
- Использование методик и технологий MRV (measurement, reporting, verification). Этот принцип означает, что в природных климатических проектах объем увеличения нетто-поглощения углерода нуждается в оценке, отчете и верификации.
- Постоянство. Такие проекты предполагают длительный срок поглощения углерода (до 45 лет) и требуют гарантий осуществления поддерживающих мероприятий на этот период времени.
- Учет рисков “утечки углерода”. Проекты должны учитывать возможности перераспределения предотвращенных выбросов с территории его реализации на соседние территории, риски “непостоянства” (потери накопленного пула углерода, например, в результате лесного пожара), а также наличие требований по резервированию части углеродных единиц для компенсации этих рисков.

Обобщение опыта реализации агроклиматических проектов в странах БРИКС+ позволяет определить наиболее перспективные для России проекты, а также выявить эффективные инструменты стимулирования их реализации. Помимо этого, организация международного сотрудничества в этой сфере в рамках БРИКС+ позволит реализовать принципы кооперации в совместном использовании информационных, финансовых, кадровых и материальных ресурсов. Климатическая политика в области сельского хозяйства, реализуемая в Китае, Индии и Бразилии, представляет собой как научный, так и практический интерес для России, поскольку позволяет адаптировать наиболее эффективные инструменты и методы к отечественным экономическим, климатическим и социальным условиям. Опыт этих стран в реализации климатических проектов в сельском хозяйстве разнообразен и охватывает управление почвенными процессами, переработку навоза в метан и электричество, управление твердыми отходами.

По данным Всемирного банка, страны БРИКС являются источниками 43% всего объема метана, 52% углекислого газа и 43% закиси азота, эмитированных сельским хозяйством мира [411]. Можно сказать, что эти страны ответственны практически за половину всего объема выбросов парниковых газов сельского хозяйства мира. Ключевыми эмитентами в рамках БРИКС метана являются Китай, Индия и Бразилия, что обусловлено

развитым животноводством и рисоводством в этих странах. Новые страны-участницы БРИКС+ являются источником менее 20% всех выбросов метана объединения стран. Источником засыпи азота являются, в основном, сельскохозяйственные почвы. В структуре эмитентов засыпи азота закономерно лидирует Китай, обладающий наибольшей площадью сельскохозяйственных угодий среди анализируемых стран. Суммарно на Индию, Бразилию и Китай приходится около 75% всего объема засыпи азота, эмитируемого БРИКС+ [412].

Анализ количества верифицированных климатических проектов в области сельского хозяйства в мире, проведенный на основе базы данных проектов в рамках добровольных углеродных кредитов, показывает, что приблизительно 61 % таких проектов приходится на страны БРИКС. Проекты улучшенного управления ирригацией и сокращения выбросов ПГ при выращивании риса практически в полном объеме реализуются в странах БРИКС.

Обобщение опыта стран БРИКС в реализации климатических проектов в области сельского хозяйства позволяет сделать вывод о том, что инициация таких проектов, как правило, начинается со стороны государства. Фермеры в этом процессе принимают активное участие как исполнители проектов. Кроме того, организация верификации климатических проектов на национальном и международном углеродном рынке позволяет получать дополнительный доход за счет продажи верифицированных углеродных единиц. Беднейшие слои населения, участвующие в программе облесения на деградированных почвах Индии, высаживают лесополосы между сельскохозяйственными участками, тем самым увеличивая поглощение углерода. В результате достигаются экологические, экономические и социальные эффекты. Без участия в программе государства фермеры, особенно их беднейшая часть, не смогли бы получить доступ к необходимым ресурсам.

Обобщение накопленного опыта реализации агроклиматических проектов странами БРИКС+ демонстрирует ряд сложностей и барьеров:

1. Финансовые ограничения. Низкий уровень финансирования капиталоемких природосберегающих и агроклиматических технологий ввиду бюджетных ограничений, высоких ставок кредитования, колебания курсов валют, а также ограниченного доступа к международным рынкам зеленого финансирования и прямым иностранным инвестициям из-за усиливающихся процессов деглобализации.
2. Технологическое отставание. Низкий уровень готовности технологий реализации агроклиматических проектов, санкционные ограничения к международным технологическим рынкам и передовому оборудования, в том числе в области мониторинга потоков климатически активных газов.
3. Слабая межгосударственная координация и неразвитость единых стандартов в области реализации климатических проектов стран БРИКС+. Различие в нормативной и

технической базе, сложности с сертификацией и отсутствие единых механизмов реализации климатических проектов и общих рынков углеродных единиц осложнит масштабирование проектов и их совместную реализацию, а также зачет углеродных единиц при реализации механизма трансграничного углеродного регулирования.

4. Социально-экономические противоречия. При конфликте между продовольственной безопасностью и экологической эффективностью приоритет отдается первому, что может негативно повлиять на эмиссию парниковых газов и переход к ресурсосберегающему хозяйству. Также развитие агроклиматических проектов осложняет низкая осведомленность фермеров о возможностях и выгодах перехода к агроклиматическим практикам.

Информационная и образовательная поддержка возможных участников агроклиматических проектов, координация их инициатив должна быть организована максимально удобно, чтобы не отвлекать от повседневных производственных задач. Одним из микроэкономических барьеров развития агроклиматических проектов является сложность поиска информации и подготовки документации. Это демотивирует основных участников. Государство в этой связи должно взять на себя функции организатора и координатора действий.

Социальные эффекты, достигаемые за счет реализации агроклиматических проектов, связаны с повышением благополучия фермеров, участвующих в проектах, и сохранением местной культуры. В связи с этим не только экономические стимулы должны лежать в основе реализации климатической политики, но и социальные и экологические. Проекты переработки навоза в биотопливо и электричество, реализуемые в Китае, приводят к выработке собственной электроэнергии и решают задачу управления отходами животноводства.

Поддержка агроклиматических проектов в развивающихся странах со стороны международных организаций позволяет более справедливо распределять финансовые ресурсы для решения климатических задач, поскольку зачастую развивающиеся страны являются сырьевой базой для развитых стран. Создание единого инвестиционного фонда БРИКС+ снизит зависимость входящих в объединение стран от геополитического влияния международных фондов и сформирует альтернативную систему финансовой поддержки климатических проектов.

Для формирования единой системы реализации агроклиматических проектов в рамках БРИКС+ требуется решение отдельных задач:

- 1) Разработка единых методик оценки количественного определения секвестрации или сокращения эмиссии СО₂ в результате реализации агроклиматических проектов, в том числе требований по валидации и верификации;
- 2) Разработка системы стандартов углеродного рынка БРИКС+, которые в том числе предусматривали бы возможность зачета углеродных единиц в рамках национальных обязательств системы торговли квотами или углеродного налогообложения эмиссии ПГ;
- 3) Создание общей инфраструктуры торговли углеродными единицами внутри блока БРИКС+ с возможностью выхода на другие международные рынки, включая платформу для биржи, депозитариев, информационных систем и платежных инструментов.

Обобщение опыта стран БРИКС+, преимущественно Китая, Индии и Бразилии, в реализации агроклиматических проектов позволяет выделить следующие виды стимулов к их распространению:

1. Экономические стимулы, возникающие за счет снижения производственных затрат и получения дополнительного дохода от реализации верифицированных углеродных единиц;
2. Экологические стимулы, связанные с улучшением природных условий проживания местного населения за счет переработки сельскохозяйственных отходов, в частности, жидких отходов животноводства;
3. Социальные стимулы, позволяющие вовлекать фермеров и местных жителей в реализацию климатических проектов с целью управления традиционно используемыми природными ресурсами и сохранения традиционной культуры.

В качестве рекомендаций для стимулирования развития агроклиматических проектов в России выделим следующее [413]. Как показано в предыдущем исследовании, связанном с оценкой экономической эффективности проекта облесения залежных земель, экономическая эффективность долгосрочных климатических проектов характеризуется не только низкой (или отрицательной) эффективностью, но и высокими рисками. Поэтому в таких условиях инициатива при организации климатических проектов должна исходить из государственных органов. Преодолеть низкую эффективность возможно за счет кооперации и совместного использования ресурсов. Опыт стран БРИКС свидетельствует о том, что агроклиматический проект может быть успешно реализован в определенном регионе несколькими фермерами.

12.2 Рекомендации по формированию институциональных условий для целенаправленного участия предприятий сектора естественной монополии в реализации климатических проектов и переходе к низкоуглеродной модели на национальном и региональном уровнях (на примере теплоэнергетики)

Современная климатическая политика России формируется под воздействием двойного вызова – необходимости поддержания энергетической безопасности и соблюдения национальных интересов, с одной стороны, и выполнение национальных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов – с другой. Соответствующие этим вызовам долгосрочные цели и приоритеты развития отражены в актуальных Стратегиях социально-экономического и научно-технологического развития, Энергетической стратегии, а также Климатической доктрине РФ, утверждающей цель достижения углеродной нейтральности к 2060 году.

Напомним, что в целевом сценарии СНУР РФ 2050 для достижения углеродной нейтральности акцент сделан на более чем двукратном увеличении поглощения парниковых газов – до 1200 млн т CO₂-экв к середине столетия. При этом подразумевается сокращение выбросов только на 289 млн т CO₂-экв по сравнению с 2019 годом. В то же время ряд исследований показывает, что в России сохраняется существенный потенциал технологического сокращения антропогенных выбросов в наиболее углеродоемких секторах экономики. Наибольший потенциал декарбонизации связан с топливно-энергетическим комплексом, на который, как в мире, так и в России, стабильно приходится около 80 % выбросов ПГ [414]. Почти половина из них образуется в теплоэнергетике – секторе, который обеспечивает население и бизнес тепловой и электрической энергией, производимой преимущественно из ископаемого топлива (Рисунок 96).



Рисунок 96 – Структура потребления первичных энергоресурсов в России в 2022 году
(Составлено авторами [415])

Как следует из Рисунка 96, на теплоэнергетику, которая включает в себя производство электрической и тепловой энергии, а также потребление энергоресурсов населением, приходится 44,7% потребления первичных энергоресурсов и, соответственно, энергетических выбросов ПГ в стране. Данная отрасль заметно превосходит такие энергоемкие сектора, как обрабатывающая (19,6%) и добывающая промышленность (9,7%), а также транспорт (16,1%). Следовательно, модернизация теплоэнергетики является одним из ключевых направлений реализации национальных климатических обязательств и достижения углеродной нейтральности.

Исследования показывают, что резерв технологического снижения выбросов в теплоэнергетике остается значительным. Согласно оценкам Центра энергоэффективности, сокращение выбросов за счет модернизации энергетики относительно 2021 года может составить 226 млн т СО₂-экв к 2030 году и 883 млн т к 2050 году [416]. Аналогичные сценарии Института народнохозяйственного прогнозирования РАН предполагают сокращение энергетических выбросов на 56-400 млн т СО₂-экв к середине века [417]. Выполненные авторами отчета оценки показывают, что комплексная трансформация теплоэнергетики на основе энергосбережения, повышения энергоэффективности и снижения доли углеродоемких источников энергии способна обеспечить уменьшение выбросов на 320 млн т СО₂-экв к 2030 г. и на 775,6 млн т СО₂-экв к 2050 г. [415]. Такой комплексный сценарий преобразования отрасли согласуется с национальными приоритетами энергетической безопасности, поскольку опирается на наилучшие доступные технологии и не требует радикального изменения топливного баланса.

Альтернативным или дополнительным направлением декарбонизации выступает участие энергетических компаний в климатических проектах, включая развитие карбоновых полигонов и углеродно-поглощающих практик в землепользовании. Это направление приобретает особое значение по мере исчерпания технологического потенциала снижения выбросов. Однако реализация климатических проектов, как и техническая модернизация, требует значительных инвестиций, тогда как финансовое положение большинства энергоснабжающих компаний, особенно в теплоснабжении, остается нестабильным [415, 418, 419].

12.2.1 Особенности структурного реформирования и регулирования энергетики в России и за рубежом

Сложившееся состояние российской теплоэнергетики, характеризующееся высоким износом основных фондов, недостаточной динамикой показателей энергетической эффективности и финансовыми ограничениями, во многом обусловлено несовершенством институциональной среды, которая не формирует достаточных стимулов и ресурсов для

повышения эффективности деятельности энергетических компаний [418, 420]. Во многих странах начиная с конца XX века энергетическая отрасль претерпела масштабные реформы, основанные на поэтапном deregулировании – переходе от вертикально-интегрированных государственных монополий к конкурентным оптовым, а в наиболее продвинутых моделях и к розничным рынкам [421]. Вертикально-интегрированные структуры, традиционно зависимые от бюджетной поддержки, часто демонстрировали низкую рентабельность и медленное обновление основных фондов. Поэтому ключевыми задачами реформ стали привлечение частного капитала и создание рыночных стимулов для повышения эффективности энергоснабжающих компаний.

Реформирование российской теплоэнергетики, преследуя схожие цели, проходило в два этапа, основные характеристики которых приведены в Таблице 53.

Таблица 53. Этапы реформирования российской теплоэнергетики (Составлено авторами: [419])

Этапы реформы	I этап (2007-2008 гг.) Реформа РАО «ЕЭС России»	II этап (2017-2018 гг.) Реформа теплоснабжения
Основные цели	Привлечение частного капитала, формирование конкурентного сегмента в электроэнергетике	Привлечение частного капитала, снижение инвестиционного дефицита (~50% от потребности), модернизация инфраструктуры
Ключевые механизмы	Долгосрочные договоры поставки мощности (ДПМ); разделение сегментов генерации, передачи и сбыта	Механизм «альтернативной котельной» (частично свободное ценообразование с «эталонным» пределом); закрепление статуса ЕТО с инвестиционными обязательствами
Достигнутые результаты	Приток инвестиций; формирование базовых розничных стимулов; умеренное повышение эффективности генерации	Создание новых тарифных стимулов; формальное закрепление ответственности ЕТО за модернизацию инфраструктуры
Ограничения и нерешенные проблемы	Высокая концентрация на рынке; барьеры входа и выхода; до 80% инвестиций шло на ремонт, а не модернизацию; сохранение перекрестного субсидирования в теплофикации; сохранение одновременного участия ТЭЦ в регулируемом и конкурентом сегментах	Сохранение роста тарифной нагрузки на потребителей без сопоставимого роста инвестиций в модернизацию основных средств; снижение эффективности теплофикации (недозагрузка ТЭЦ); слабые стимулы к модернизации; рост задолженности за ЖКУ и усиление социальных рисков; сохранение износа основных фондов и негативной динамики

		показателей энергетической и экономической эффективности
--	--	--

Как видно из Таблицы 53, оба этапа реформ преследовали общую цель – привлечение частного капитала в энергетический сектор, но при различной институциональной логике.

Первый этап (2007-2008 гг.), связанный с ликвидацией РАО «ЕЭС России», привел к формированию модели конкурентного оптового рынка при сохранении сетевого сегмента под государственным контролем. Реформа обеспечила приток инвестиций и частичное повышение эффективности генерации [422]. Однако в секторе сохранялся ряд институциональных ограничений, сдерживающих его эффективное функционирование: высокая рыночная концентрация, барьеры на вход и выход, а также слабая мотивация компаний к модернизации [423]. В итоге до 80% привлекаемых в данный сектор средств направлялось на текущий ремонт, а не на обновление и модернизацию основных фондов [424].

На втором этапе (2017-2018 гг.) была предпринята попытка реформы теплоснабжения, но реальный эффект оказался противоположным заявленным целям. Монопольные позиции крупнейших игроков в регионах были закреплены статусом Единой теплоснабжающей организации (ЕТО) с формальными инвестиционными обязательствами. Вместо структурного deregулирования акцент был сделан на изменение механизма ценообразования по методу «альтернативной котельной». Практика показала, что этот инструмент не обеспечил модернизации инфраструктуры и не снизил тарифную нагрузку на потребителей, включая население [425-427]. В условиях растущих долгов за ЖКУ [428] и ограниченной платежеспособности населения это усилило социальные и финансовые риски, проявившиеся, например, в виде вынужденного и чувствительного для населения повышения тарифов летом 2025 г [429].

Незавершенность реформ и противоречивость регулирующих механизмов напрямую сказалась на производственных и финансовых показателях отрасли. С 2015 года только в электроэнергетике наблюдалось постепенное снижение удельного расхода топлива и потерь в сетях, тогда как в теплоснабжении эти важнейшие показатели энергоэффективности либо стагнировали, либо ухудшались [430]. Кроме того, в теплоснабжении стабильно фиксируется существенная доля убыточных организаций и отрицательный суммарный финансовый результат (Таблица 54) [418].

Таблица 54. Анализ убыточности секторов электро- и теплоснабжения в 2022 г.

(Составлено авторами: [418])

Электроснабжение			
	Количество прибыльных компаний	Количество убыточных компаний	Доля убыточных компаний
Частная собственность	1865	279	13,0%
Муниципальная собственность	110	47	29,9%
Совместная частная и иностранная собственность	40	5	11,1%
Смешная российская собственность	62	7	10,1%
Собственность субъектов Российской Федерации	23	16	41,0%
Собственность иностранных юридических лиц	26	7	21,2%
Иные формы собственности	12	1	7,7%
Всего 2500 компаний	2138	362	
Соотношение	85,5%	14,5%	
Теплоснабжение			
	Количество прибыльных компаний	Количество убыточных компаний	Доля убыточных компаний
Частная собственность	1085	438	28,8%
Муниципальная собственность	323	543	62,7%
Смешанная российская собственность	46	18	28,1%
Собственность субъектов Российской Федерации	13	20	60,6%
Иные формы собственности	12	2	14,3%
Всего 2500 компаний	1479	1021	
Соотношение	59,2%	40,8%	

Примечание: В связи с ограничениями по объему выборки в системе СПАРК-Интерфакс, анализ выполнен для 2500 крупнейших по выручке компаний из секторов электро- и теплоснабжения. Общее число компаний в этих секторах на момент анализа составляло 6429 и 8996 соответственно.

Как видно из Таблицы 54, в секторе теплоснабжения, где конкурентные условия так и не были сформированы, порядка 40% всех компаний остаются убыточными, а среди организаций в муниципальной и региональной собственности – более 60%. Для сравнения, в частично deregулированном секторе электроснабжения доля убыточных предприятий не превышает 15%. Эти данные отражают экономическую неустойчивость муниципальных и

региональных государственных компаний в обоих секторах, которые, одновременно, обладают значительной долей на рынках по выручке.

В таких условиях энергоснабжающие компании, особенно государственные и муниципальные, не располагают ресурсами для модернизации и участия в климатических проектах. Отсутствие конкурентного давления и предсказуемых правил тарифного регулирования не создает стимулов к повышению энергоэффективности. При этом наиболее убыточные сегменты получают ежегодные бюджетные субсидии в сотни миллиардов рублей [418, 426]. Однако и этих средств недостаточно для преодоления накопленных технико-экономических проблем и вывода российской теплоэнергетики на траекторию устойчивого низкоуглеродного развития [415].

Таким образом, институциональные условия в российской теплоэнергетике в текущем виде не соответствуют задачам перехода на низкоуглеродную модель развития. Если в электроэнергетике частично реализованы рыночные механизмы и принципы возврата инвестиций, то теплоснабжение продолжает функционировать в рамках неэффективных моделей тарифного регулирования и перекрестного субсидирования. Итогом этого является высокий износ фондов, низкая рентабельность и ограниченный потенциал участия сектора в достижении климатических целей.

12.2.2 Структурные и региональные особенности развивающейся сферы климатических проектов в России

Несмотря на значительный потенциал технологического сокращения выбросов, институциональные ограничения и низкая финансовая устойчивость теплоэнергетики существенно сужают возможности компаний по участию в инициативах низкоуглеродного развития. При этом одним из ключевых направлений реализации климатической политики становится формирование углеродного регулирования, призванного стимулировать бизнес к сокращению и компенсации выбросов парниковых газов. Этот механизм создает основу для климатических проектов, позволяющих компаниям не только снижать собственные выбросы, но и генерировать и размещать на биржах углеродные единицы (УЕ), что особенно важно в условиях ограниченных инвестиционных ресурсов и усиливающихся международных требований к снижению углеродного следа.

Напомним, что институциональную основу достижения климатических целей в России образует система углеродного регулирования, включающая два периметра – жесткий и мягкий [431]. Жесткий периметр охватывает обязательное регулирование крупнейших организаций с годовыми выбросами свыше 150 млн т СО₂-экв, а также аудит и мониторинг предприятий, у которых выбросы превышают 50 млн т СО₂-экв [432]. На момент выполнения данного исследования объем зарегистрированных регулируемыми

организациями единиц выполнения квоты (эквивалентных 1 т СО₂) превышал 26 тыс. единиц [433]. Мягкий периметр включает добровольные климатические проекты, реализуемые преимущественно экспортно-ориентированными компаниями. Эти проекты направлены на получение углеродных единиц и их последующую верификацию в национальных и международных системах учета, что позволяет компаниям снижать углеродный след и сохранять конкурентоспособность на мировых рынках [434]. Данный сегмент углеродного регулирования демонстрирует активный рост. По данным Реестра углеродных единиц, на начало июня 2025 года зарегистрировано 66 добровольных проектов с совокупным объемом более 125,4 млн УЕ (Рисунок 97).

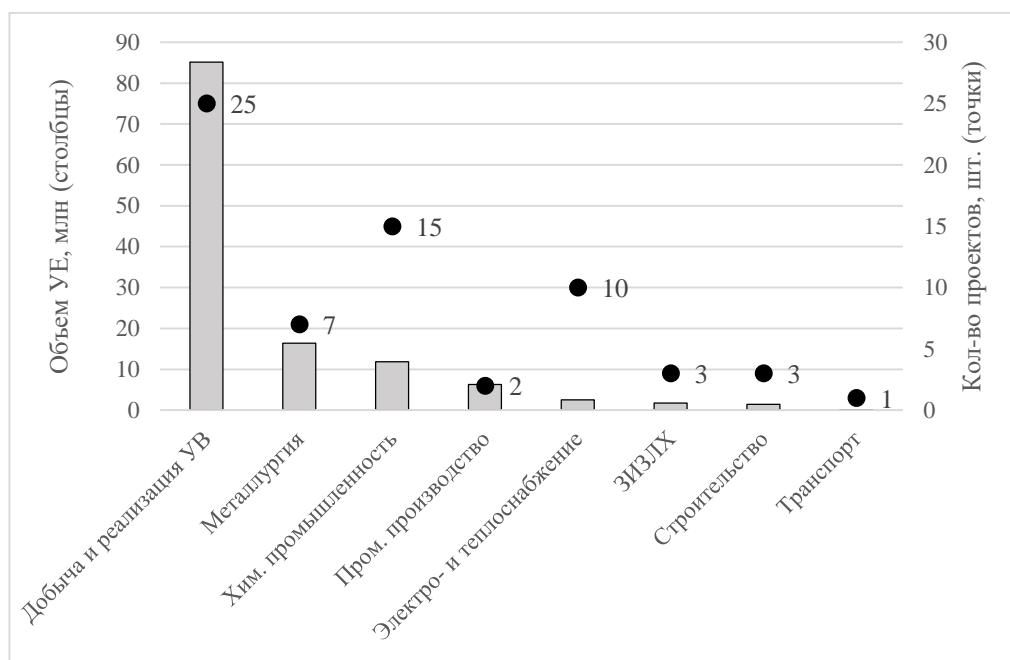


Рисунок 97 – Отраслевая структура инициаторов климатических проектов (Составлено авторами: [418])

Основными инициаторами климатических проектов в России являются нефтегазовые компании – они реализуют более 42% проектов, на которые приходится почти 68% общего объема углеродных единиц (85,13 млн УЕ). Второе место по количеству реализуемых проектов занимает химическая промышленность, преимущественно нефтехимия – 15 климатических проектов объемом почти 11,84 млн УЕ. По объему углеродных единиц на втором месте расположены компании из металлургической отрасли. Они зарегистрировали 7 проектов на 16,42 млн УЕ.

Если говорить о распределении климатических проектов по типу, то большинство из них, а именно, 28 проектов суммарным объемом более 96,64 млн УЕ (75% от общего

объема) – представляют собой решения в области сокращения технологических выбросов и предотвращения утечек углеводородов (Рисунок 98).

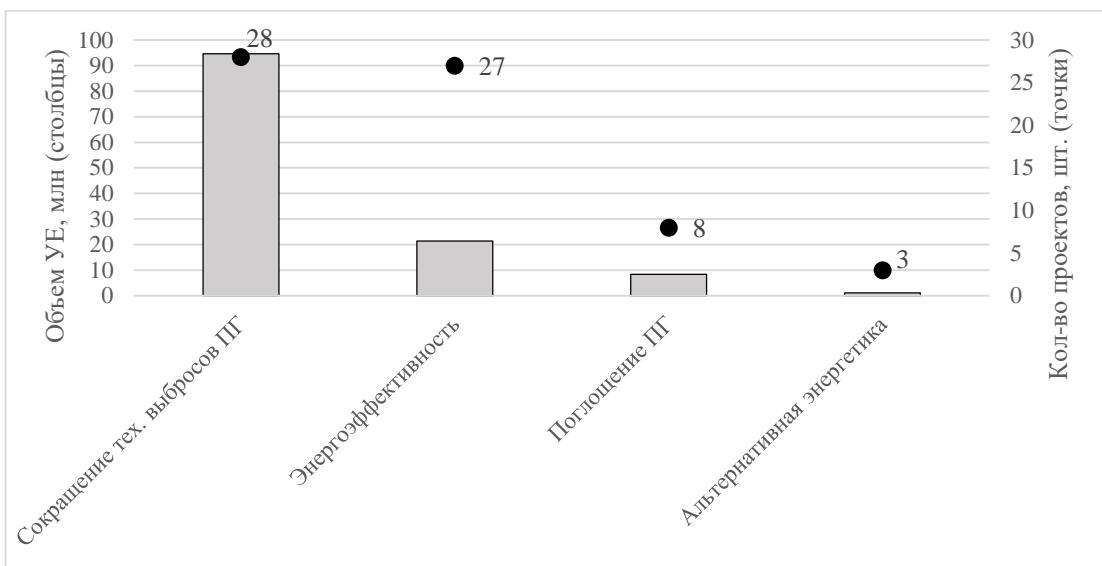


Рисунок 98 – Структура климатических проектов по типам технологических решений
(Составлено авторами: [418])

Не менее популярным направлением является повышение энергетической эффективности, реализуемое не только энергоснабжающими компаниями, но и нефтегазовыми, а также металлургическими. Подобные решения представлены в 27 проектах, однако их объем существенно меньше – 21,37 млн UE. Причем только около 6,6% углеродных единиц получено в ходе реализации мер в области увеличения поглощения ПГ природными экосистемами, которые реализуются как компаниям из сектора землепользования и лесного хозяйства, так и металлургами и предприятиями химической промышленности. Напомним в этой связи, что в Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов ПГ ключевая роль в декарбонизации экономики отводится именно более чем двукратному увеличению поглощения ПГ природными экосистемами, а не снижению техногенной эмиссии [435].

Отличительной чертой российской структуры климатических проектов является доминирование технологических решений, направленных на снижение выбросов и утечек углеводородов, при относительно низкой доле проектов по повышению энергоэффективности и особенно по развитию природных экосистем, что контрастирует с общемировыми тенденциями. Так, по данным MSCI, в 2024 году около 30% всех UE приходилось на проекты в сфере землепользования и лесовосстановления, почти столько же – на возобновляемую энергетику, и еще около 22% – на повышение энергоэффективности [436]. Региональный анализ глобального рынка UE показывает

заметную вариативность: от преобладания природно-климатических проектов в Северной и Латинской Америке до доминирования энергоэффективности и возобновляемой энергетики в странах Африки и Юго-Восточной Азии. Эти различия обусловлены не только природными и технологическими факторами, но и особенностями сформированной в этих регионах институциональной среды, определяющей приоритетные направления национальной климатической политики.

Таким образом, действующая в Российской Федерации модель добровольных проектов в связке с рынком углеродных единиц формирует ограниченный и неоправданно узкий профиль климатических инициатив, который не обеспечивает должной диверсификации и раскрытия в полной мере потенциала энергосбережения и природно-климатических решений. Это указывает на необходимость переосмысления механизмов вовлечения в эти проекты бизнеса, особенно в сферах с высоким потенциалом сокращения выбросов ПГ, включая теплоэнергетику. Одним из возможных направлений такой адаптации может стать региональная настройка институциональных условий, учитывающая как отраслевую структуру ВРП, так и природно-климатические особенности территорий.

Анализ территориального распределения климатических проектов в России демонстрирует выраженную региональную и отраслевую концентрацию как по количеству, так и по масштабу реализуемых инициатив (Рисунок 99). Всего на момент написания статьи 66 климатических проектов с общим объемом в 125,4 млн УЕ были представлены в 22 регионах России. Как можно видеть на рис. 11, лидером по объему генерируемых УЕ выступает Ленинградская область, в которой реализуется всего два проекта. Один из них, являющийся крупнейшим в стране, предполагает генерацию более 78 млн УЕ за счет предотвращения выбросов ПГ с использованием мобильных компрессорных станций при подготовке участков магистральных трубопроводов к проведению ремонтных работ ООО «Газпром МКС». В Красноярском крае, занимающем вторую строчку по масштабам климатических инициатив, реализуется четыре проекта, два из которых (один в области повышения энергоэффективности и один лесоклиматический) обеспечивают около 13 млн УЕ и реализуются металлургическими компаниями – АО «ПОЛЮС Красноярск» и АО «РУСАЛ Красноярск».

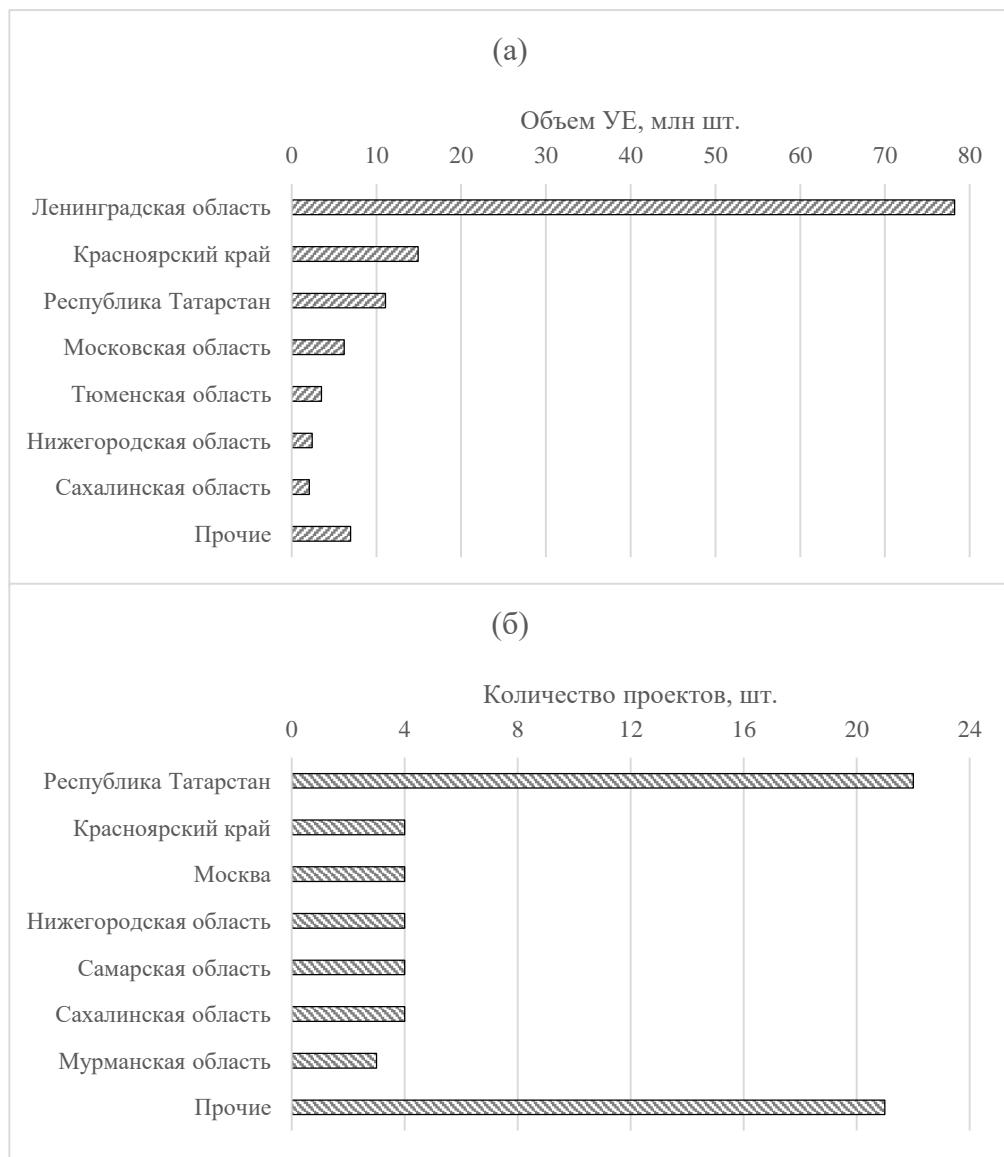


Рисунок 99 – Региональное распределение климатических проектов (а) по объему и (б) по количеству (Составлено авторами: [419])

По количеству климатических инициатив лидирует Республика Татарстан, где зарегистрированы 22 проекта, суммарным объемом более 11 млн УЕ, что составляет почти 9% от общего объема по стране. Практически все инициативы в регионе реализуются ПАО «Татнефть», которое последовательно интегрирует климатические цели в свою корпоративную стратегию. С 2022 года в стратегии развития компании утвержден климатический раздел и установлена цель достижения углеродной нейтральности к 2050 году в части контролируемых выбросов ПГ. Используя распространенный в корпоративной среде подход к оценке климатических проектов на основе внутренней стоимости углерода на уровне 49 долл. за т CO₂, ПАО «Татнефть» уже несколько лет фиксирует положительные экономические результаты проектов в области снижения выбросов ПГ [437].

Активную поддержку климатических инициатив оказывают и региональные власти Республики Татарстан. Так, в 2021 году была создана Межведомственная рабочая группа по вопросам климатической политики и планов по декарбонизации Республики Татарстан, в состав которой вошли представители профильных ведомств, крупнейших компаний топливно-энергетического комплекса и научно-исследовательских организаций [438]. В 2023 году эта рабочая группа утвердила План реализации Стратегии социального-экономического развития с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года, в котором особое внимание уделено инновационному и низкоуглеродному развитию энергетического сектора, лесовосстановлению и лесоохране, а также интеграции Республики в международное углеродное регулирование по методологии ЕАЭС [439]. Отметим, что Сахалинская область, будучи пилотным регионом для инициированного на федеральном уровне эксперимента по формированию необходимых условий для достижения углеродной нейтральности [440], не демонстрирует лидерства ни по количеству, ни по масштабу климатических проектов. Это может свидетельствовать о недостаточной результативности или высокой инертности централизованного подхода к климатическому регулированию «сверху вниз» по сравнению с более гибкими и прагматичными инициативами бизнеса.

Как можно заключить, структура климатических проектов в России демонстрирует их ограниченную диверсификацию и значительную концентрацию в отдельных отраслях и регионах. Высокая концентрация климатических инициатив в отдельных субъектах РФ объясняется преимущественно активным участием местных промышленных экспортно-ориентированных компаний, для которых основным мотивом реализации климатических проектов является сохранение конкурентоспособности на мировых рынках, а не получение прибыли от реализации УЕ на бирже [441]. В отдельных регионах корпоративная активность сопровождается поддержкой со стороны региональных органов власти, что может стать источником синергетического эффекта и ключевым фактором результативного включения территорий в реализацию национальных целей устойчивого и низкоуглеродного развития.

В то же время теплоэнергетика и другие секторы, относящиеся к ЕМ, несмотря на их существенный вклад в национальные выбросы ПГ, практически отсутствуют среди участников климатических проектов. Это указывает на институциональные ограничения – недостаток стимулов, дефицит ресурсов и нерентабельность участия в таких проектах. Тем не менее, пример Республики Татарстан, демонстрирует результативность коллaborации корпоративных стратегий с региональной политикой в части развития местных климатических инициатив. Обозначенные факторы подтверждают необходимость

системной адаптации климатической политики и регуляторной среды, особенно в процессе завершения реформирования сохраняющих естественно монопольную структуру секторов.

12.2.3 Рекомендации по интеграции задач климатической политики в процесс реформирования российской теплоэнергетики

Как можно заключить из проведенного анализа, действующая модель углеродного регулирования в России остается фрагментарной и в большей степени ориентированной на внешние стимулы. Ключевыми инициаторами климатических проектов выступают компании, участвующие в международной конкуренции и обязанные соблюдать зарубежные экологические стандарты, что ограничивает отраслевое и территориальное разнообразие реализуемых климатических инициатив. При этом решающее значение для подключения компаний к климатическим проектам имеет возможность верификации и зачета углеродных единиц в зарубежных системах, а не их монетизация.

Недостаточная вовлеченность в реализацию климатических проектов энергоснабжающих компаний, относящихся к секторам естественных монополий, обусловлена слабостью экономических стимулов, ограниченностью финансовых ресурсов и их зависимостью от локальных, подверженных тарифному регулированию рынков. Несмотря на то, что энергоснабжающие организации относятся к числу основных эмитентов ПГ в стране, они практически не представлены среди участников добровольных климатических инициатив [419]. Доходы предприятий, работающих в условиях жесткого регулирования, не зависят от сокращения выбросов ПГ, а инвестиционные программы преимущественно направлены на поддержание текущих активов, а не на их модернизацию.

В наиболее проблемных сегментах, прежде всего в теплоснабжении, компании остаются зависимыми от государственной поддержки и субсидирования, не располагая свободными средствами для инновационного, в том числе низкоуглеродного, развития. В этих условиях перспективным решением может стать поддержка спроса на углеродные единицы, полученные от проектов по повышению энергоэффективности в теплоэнергетике. С учетом их сравнительно низкой себестоимости и более быстрой окупаемости по сравнению, например, с лесоклиматическими проектами [442], целесообразна политика ценовой доступности таких УЕ при условии их верификации в национальных и зарубежных системах. Это позволит сформировать нишу спроса на УЕ со стороны компаний, заинтересованных в компенсации остаточных выбросов, и создать стимулы для энергоснабжающих организаций к модернизации инфраструктуры и участию в климатических инициативах.

Выявленные институциональные барьеры указывают на необходимость перехода от точечных решений к комплексной институциональной адаптации климатической и

энергетической политики в процессе завершения реформирования российской теплоэнергетики. Важно обеспечить согласованность между задачами по завершению реформирования в сфере ЕМ и развитием механизмов климатического регулирования, ориентированных на повышение энергоэффективности, снижение углеродных выбросов и привлечение инвестиций.

На основе анализа отраслевой специфики российской теплоэнергетики и обобщения зарубежного опыта авторами предложена следующая карта ключевых направлений институциональной модернизации (Таблица 55).

Таблица 55. Карта инструментов институциональной реформы для обеспечения устойчивого низкоуглеродного развития теплоэнергетики (Составлено авторами: [419])

Направление	Инструменты	Примеры / ожидаемые эффекты
Регулирование	Внедрение показателей энергоэффективности и углеродоемкости в тарифную модель; Стандарты минимальной энергоэффективности; Экологическое лицензирование.	Сдерживание роста издержек; Вытеснение неэффективных технологий.
Структурная реформа	Разделение генерации и сетей и поэтапное дерегулирование сегмента генерации в теплоснабжении; Закрепление инвестиционных обязательств за энергоснабжающими организациями; Наделение потребителей правом принятия управлеченческих решений.	Повышение конкуренции; Адресная модернизация; Спрос на повышение эффективности энергокомпаний.
Климатическая интеграция	Корректировка методик расчета и оценки УЕ для энергетических климатических проектов; Верификация таких УЕ в зарубежных системах.	Рост числа энергетических компаний, реализующих климатические проекты.
Ценообразование УЕ	Обеспечение ценовой доступности УЕ, полученных в результате энергетических климатических проектов; Поддержка спроса со стороны бизнеса.	Стимулирование рынка; Привлечение инвесторов в такие проекты.
Финансирование	Субсидирование, гранты и налоговые льготы; «Зеленые» госзакупки и сертификаты; Специализированные фонды.	Привлечение инвестиций, запуск локальных и муниципальных проектов.

Информирование и поведенческие инструменты	Кампании энергопросвещения; Платформы обмена лучшими практиками; Подталкивание к энергосбережению и поощрение активных потребителей.	Снижение сопротивления реформам; Усиление спроса на экологические практики среди граждан и малого предпринимательства.
Регионально-корпоративное взаимодействие	Интеграция корпоративных стратегий с региональными программами; Формирование локальных климатических альянсов или кластеров.	Расширение охвата климатических проектов; Укрепление региональной климатической политики.

Системное применение таких инструментов требует опоры на международно апробированные подходы к стимулированию энергоэффективности и декарбонизации. Анализ рекомендаций Международного энергетического агентства, ОЭСР и других организаций позволяет выделить четыре группы организационно-экономических инструментов, наиболее широко применяемых в странах с развитыми, инновационными и экологически устойчивыми энергосистемами: регулирование, информирование, стимулирование и финансирование [443]. Опыт стран ОЭСР и Скандинавии показывает, что эффективность подобных инструментов усиливается при высокой степени дерегулирования отрасли и прозрачных институциональных условиях. Соответственно, их успешная адаптация в России возможна при параллельном завершении структурного реформирования естественно-монопольных секторов, прежде всего теплоснабжения, и развитии интегрированных климатических стимулов в тарифном и инвестиционном регулировании.

Таким образом, результативное вовлечение регулируемых отраслей, включая теплоэнергетику, в достижение климатических целей требует разумной донастройки существующих механизмов с учетом приоритетов устойчивого развития и современных энерго-климатических вызовов. Интеграция климатических стимулов в тарифную модель, поддержка корпоративных климатических инициатив на региональном уровне, ценовая доступность ЕС, а также активное информирование и вовлечение потребителей формируют фундамент обновленной институциональной среды, необходимой для перехода к низкоуглеродной модели развития энергетики. Эти меры направлены не только на устранение институциональных барьеров, но и на создание условий для синергии экономической эффективности, энергетической безопасности и экологической устойчивости.

Проведенный анализ показал, что институциональная среда, формирующая стимулы для декарбонизации углеродоемких естественно монопольных секторов, в современной

России остается внутренне несбалансированной и недостаточно согласованной с механизмами климатического регулирования. Продолжающаяся зависимость теплоэнергетики от господдержки и тарифного регулирования ограничивает инвестиционные возможности компаний, снижает их мотивацию к модернизации и фактически исключает из числа активных участников климатических инициатив.

Для достижения национальных целей углеродной нейтральности необходимы комплексные институциональные преобразования, обеспечивающие связку между реформой естественных монополий, политикой энергоэффективности и развитием рынка углеродных единиц. Международный опыт подтверждает, что успешная декарбонизация энергетических систем требует сочетания инструментов регулирования, стимулирования, информирования и финансирования, поддерживаемых прозрачной системой управления и участием всех ключевых стейкхолдеров.

В этих условиях приоритетом государственной энергетической и климатической политики может стать создание устойчивых рыночных стимулов для энергоснабжающих компаний к повышению эффективности и сокращению выбросов. Это предполагает развитие тарифных механизмов, ориентированных на показатели энергоэффективности и углеродоемкости, расширение доступа к финансовым инструментам низкоуглеродного развития и формирование региональных площадок для взаимодействия бизнеса, власти и науки.

Такая институциональная архитектура может не только обеспечить энергетическую и климатическую устойчивость страны, но и превратить декарбонизацию в источник технологического и инвестиционного обновления на принципах энергоэффективности, конкурентоспособности и экологической ответственности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе реализации проекта разработан концепт объединенного карбонового полигона «Ладога», создание которого имеет стратегическое значение для обеспечения климатической и экологической безопасности Балтийско-Ладожского региона. Структура полигона интегрирует стационарный модуль на территории ФГБУ «ГГО им. Войкова» (площадь 150,6 га), мобильный комплекс для измерений параметров экосистем Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а также действующую сеть атмосферного мониторинга с российским центром обеспечения сопоставимости измерений. Данная архитектура обеспечивает комплексный мониторинг углеродного баланса, изучение пространственно-временной динамики парниковых газов и верификацию климатических моделей региона. Стационарная часть карбонового полигона «Ладога» расположена в пределах Колтушской возвышенности (южная часть Всеволожского района Ленинградской области) и характеризуется камовым рельефом с перепадом абсолютных высот от 32,5 до 77,5 метров. Большая часть территории занята низинным эвтрофным болотом, что определяет высокий секвестрационный потенциал данной местности. Эдафическое разнообразие представлено комплексом зональных альфегумусовых и торфяно-перегнойных почв, дополненных постагрогенными альфегумусовыми почвами с различной глубиной вспашки. Архивные данные дистанционного зондирования свидетельствуют о начале процессов вторичного облесения и закустаривания ранее 2003 года. Современный растительный покров характеризуется вторичными постагрогенными и послерубочными сообществами со значительной примесью неморальных и синантропных видов. На вершинах камовых возвышенностей доминируют березово-сосновые рябиново-ланьищевые леса на дерново-подбурах, тогда на залежных полях сформировались папоротнико-злаково-рудерально-травяные луга на постагрогенных альфегумусовых агроzemах. Гидроморфные и полугидроморфные ландшафты заняты ивовыми влажнотравными березняками и низинными рогозово-влажнотравными болотами на торфяно-перегнойных почвах, что создает уникальные условия для сравнительного изучения углеродного баланса в различных экосистемах.

В ходе трехлетнего осуществления проекта были проведены работы, которые включали: мониторинг растительного и животного мира, исследование ландшафта, анализ параметров углеродного цикла в южно-таежных экосистемах, оценку темпов накопления и стабилизации органического вещества, методы машинного обучения для анализа уровней загрязнения территории, моделирование трансформации органического вещества в модели ROMUL, параметризацию углеродных экосистемных услуг Северо-Западного региона. Выполнен мониторинг концентраций углеродсодержащих газов и N_2O методами ИК-

дистанционного зондирования, исследован секвестрационный потенциал наземных экосистем. Разработаны практические решения, включая верифицированные технологии контроля эмиссии парниковых газов на примере очистки балластных вод, программу расчета углеродного баланса Ленинградской области и методические основы создания карбоновых ферм. Проведена количественная оценка потоков CO₂ в естественных, залежных и переувлажненных землях полигона. Систематизированы методические рекомендации по выбору предприятиями эффективных решений для декарбонизации производственных процессов. Дополнительно осуществлен мониторинг аэрозольных частиц в атмосфере региона, определена специфика декарбонизации индустриального сектора и оценен потенциал развития углеродного рынка России. Полученные результаты создают научную основу для климатической политики и низкоуглеродного развития Северо-Западного региона.

Мониторинг растительного покрова Колтушских высот показал, что он характеризуется значительной антропогенной трансформацией, проявляющейся в выраженной пространственной неоднородности распределения растительных сообществ, обусловленной исторически сложившейся мелкоконтурностью землепользования в южной части Карельского перешейка. Особенностью региона является наличие сосновых лесов на камовых возвышенностях, которые могут рассматриваться как экстразональный феномен. Полученные нами данные подтверждают закономерности, ранее описанные О.Г. Чертовым: на хорошо дренированных песчаных отложениях различного генезиса, доминируют сосняки вересковые, брусничные и чернично-брусничные зеленомошные, с редким участием ельников, что отражает специфику эдафических условий и сукцессионных процессов в регионе.

Анализ животного мира показал, что полученные результаты подтверждают предварительные оценки плотности населения птиц, составившие около 480 особей/км², что соответствует типичным показателям для смешанных лесных биотопов южной тайги. Расчетная биомасса птиц варьирует в пределах 23-27 кг/км², при этом суточное потребление органического вещества данной группой составляет 11,5-21,6 кг/км² в течение 150-дневного теплого периода, что эквивалентно 1725-3240 кг/км² за сезон. Зимой утилизация органического вещества птицами значительно снижается в результате миграционного поведения и сокращения видового разнообразия. Мелкие млекопитающие демонстрируют существенно более высокий вклад в утилизацию органического вещества с годовым показателем 14600-18250 кг/км², что обусловлено их доминированием и постоянной кормовой активностью в течение года. Совокупная годовая утилизация органического вещества обеими группами позвоночных достигает 16325-21490 кг/км².

Полученные количественные оценки представляют ценность для моделирования процессов аккумуляции органического вещества в почвах карбонового полигона и понимания роли зоогенного фактора в углеродном цикле экосистем.

Проведенный мониторинг температурного режима почв на глубине 0-10 см выявил отсутствие устойчивого промерзания почвенного профиля. Динамика температуры демонстрировала тесную корреляцию с периодами формирования постоянного снежного покрова. Анализ углеродного цикла в зональных южно-таежных экосистемах выявил доминирование бактериальных фил *Proteobacteria* и *Actinobacteria* как в подзолах, так и в торфяных почвах. Таксономическая структура микробных сообществ демонстрирует четкую связь с генетическими горизонтами почв, где распределение фил и родов коррелирует с спецификой почвенных условий. Среди ключевых фил, участвующих в трансформации углерода, идентифицированы *Actinobacteriota*, *Proteobacteriota*, *Acidobacteriota*, *Bacteroidota*, *Firmicutes* и *Verrucomicrobiota*, образующие сходные группировки в разных типах почв. Количественный анализ показал максимальное обилие *Actinobacteriota* и *Proteobacteriota* в подзолистых почвах, тогда как в торфяных почвах к этим доминантам добавляется *Bacteroidota*. Выявленные закономерности подчеркивают важность учета специфики микробных сообществ при оценке потенциала углеродного цикла в различных типах почв южной тайги.

Оценка уровней накопления и стабилизации органического вещества в почвах карбонового полигона «Ладога» выявила значительную дифференциацию запасов ПОВ в метровом слое. Наибольшие показатели зафиксированы в торфяных почвах ($60,0 \pm 19,8$ кг/м²), что обусловлено активным торфонакоплением в условиях гидроморфного режима и замедленных процессов гумификации. В постагрогенных агрозёмах запасы составляют $12,8 \pm 2,9$ кг/м², тогда как в дерново-подбурах показатель достигает $8,3 \pm 1,3$ кг/м². Полученные данные демонстрируют большую роль гидрологического режима в аккумуляции углерода: эутрофные болотные экосистемы выступают основным резервуаром органического вещества на территории полигона. В то же время запасы углерода в автоморфных таёжных почвах определяются комплексом факторов, включая доминантный состав лесной растительности, видовое разнообразие травяно-кустарникового яруса, возраст древостоя и историю антропогенного воздействия. Выявленные закономерности подчеркивают необходимость учёта ландшафтной позиции и типа почвообразования при оценке секвестрационного потенциала экосистем южной тайги.

Моделирование динамики органического вещества с использованием модели ROMUL показало устойчивую тенденцию к увеличению запасов ПОВ с течением времени. На начальных стадиях процесса наблюдается преимущественно поверхностная

аккумуляция органического материала в подстиlocном горизонте. Однако при долгосрочном прогнозировании (100-летний период) выявлено снижение темпов накопления в подстилке с одновременным увеличением стабильного пула углерода в минеральных горизонтах почвы. Для повышения точности прогнозных расчетов в дальнейших исследованиях предусмотрена модернизация модели путем включения дополнительных параметров: пространственно-временной динамики температурно-влажностного режима почв, дифференцированных скоростей деструкции различных типов растительных остатков, а также микроклиматической стратификации в системе субгоризонтов подстилки. Усовершенствованная модель позволит более адекватно прогнозировать долгосрочную динамику углеродного цикла в лесных экосистемах и оптимизировать оценки секвестрационного потенциала почв.

Применение интерпретируемых моделей машинного обучения продемонстрировало высокую эффективность в прогнозировании содержания металлов и их оксидов в почвах, что имеет важное значение для разработки стратегий охраны почвенных ресурсов. Результаты исследования показали исключительную точность прогнозирования для ванадия ($MAE = 3.72 \text{ мг/кг}$, $RMSE = 4.59 \text{ мг/кг}$, $R^2 = 0.95$) и оксида титана ($MAE = 0.03\%$, $RMSE = 0.04\%$, $R^2 = 0.94$), что подтверждается высокими значениями МЕС (0.93). Анализ SHAP позволил количественно оценить вклад отдельных предикторов в прогнозные модели, выявив специфическое влияние параметров почвы и типов землепользования на пространственное распределение элементов. Установлено, что различные почвенно-геохимические процессы в минеральных и органических почвах формируют уникальные паттерны аккумуляции элементов. Методология также обеспечила определение пороговых значений предикторов, указывающих критические уровни, при которых наблюдается смена направленности их влияния на концентрации элементов. Полученные результаты подчеркивают потенциал интерпретируемого машинного обучения как инструмента для выявления сложных взаимосвязей в почвенных системах и разработки научно обоснованных решений в области управления почвенными ресурсами и экологической политики.

Проведенный мониторинг потоков климатически активных газов и оценка объемов их секвестрации почвой и растительностью зональных экосистем за период 2014-2022 гг. выявили устойчивую положительную динамику валовой первичной продукции (GPP). Скорость роста GPP составила $0.08 \pm 0.02 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$, что статистически значимо и сопоставимо с тенденциями, наблюдавшимися в хвойных лесах Германии и широколиственных лесах США. Полученные данные свидетельствуют о наличии системного тренда увеличения продуктивности экосистем Ленинградской области в

течение последних семи лет. Обнаруженная закономерность может быть обусловлена продолжающимся ростом концентрации атмосферного CO₂, наблюдаемым как в глобальном масштабе, так и на региональном уровне. Это явление соответствует концепции карбонизации - усиления продуктивности растительных сообществ под влиянием повышенных концентраций углекислого газа, что имеет важное значение для оценки секвестрационного потенциала региона в условиях изменяющегося климата.

Анализ данных пульсационных измерений потоков CO₂, выполненных на станции атмосферного мониторинга СПбГУ (Pet) в период с августа 2023 г. по июль 2024 г., выявил следующие закономерности: среднегодовая величина потока CO₂ составила $2.4 \pm 0.5 \text{ кт} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, что согласуется с ранее полученными оценками методом баланса масс ($6 \pm 4 \text{ кт} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) и результатами независимых исследований. Установлены сезонные различия: в "летний" период (апрель–октябрь) поток достигал $1.63 \pm 0.30 \text{ кт} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, тогда как в "зимний" (ноябрь–март) – $1.94 \pm 0.49 \text{ кт} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Сезонная динамика суточного хода FCO₂ демонстрирует изменение режима источников и стоков углекислого газа. В июне–августе наблюдаются отрицательные значения дневных минимумов, обусловленные фотосинтетической активностью растительности, с максимумами в вечерне-ночное время. В переходные месяцы (май, сентябрь) сохраняется аналогичный суточный ход, однако минимумы не достигают отрицательных значений вследствие снижения интенсивности фотосинтеза. В октябре–апреле регистрируется обратная картина с дневными максимумами и ночных минимумами без отрицательных значений. Эмиссия от автотранспорта составила $0.78 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в зимний и $1.49 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в летние периоды. Удельный сток CO₂, связанный с фотосинтетической активностью прилегающих растительных массивов, оценен в $0.76 \pm 0.13 \text{ кгC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, что коррелирует с данными дистанционного зондирования (GPP = $0.81 \text{ кгC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) со спутника ОСО-2 для территории Ленинградской области. Полученные результаты подтверждают значительную роль биогенного компонента в углеродном балансе урбанизированных территорий.

Проведенные исследования по разработке оптимальной методики определения интегрального содержания CO₂ (XCO₂) в атмосфере с использованием наземного FTIR-спектрометра в среднем ИК-диапазоне позволили идентифицировать два наиболее перспективных подхода. Стратегия «4880+3300_F1», основанная на анализе спектральных интервалов $3315.505\text{--}3316.055 \text{ см}^{-1}$, $3344.62\text{--}3344.94 \text{ см}^{-1}$ и $4484.90\text{--}4488.40 \text{ см}^{-1}$, и методика «2600_F2», использующая диапазоны $2620.55\text{--}2621.10 \text{ см}^{-1}$, $2626.40\text{--}2626.85 \text{ см}^{-1}$, $2627.10\text{--}2627.60 \text{ см}^{-1}$ и $2629.275\text{--}2629.95 \text{ см}^{-1}$, показали наивысшую эффективность при обработке спектров прямого солнечного излучения.

Сравнительный анализ с данными станций сети TCCON выявил преимущество методики «2600_F2», продемонстрировавшей более высокие значения коэффициента корреляции, что позволяет рекомендовать её в качестве основного метода для оперативного мониторинга с учётом специфики аппаратного обеспечения и климатических условий региона. При этом стратегия «4880+3300_F1» сохраняет потенциал для дальнейшего совершенствования при условии оптимизации соотношения сигнал/шум в спектральном диапазоне 3300–4900 см^{-1} . Полученные результаты создают основу для разработки стандартизированного протокола измерений, обеспечивающего сопоставимость данных с международными сетями мониторинга парниковых газов.

Анализ многолетних данных лидарного зондирования в центре Санкт-Петербурга выявил устойчивую сезонную динамику АОТ. Максимальные значения зарегистрированы летом: 0.194 на длине волны 355 нм и 0.070 на 532 нм. Минимальные показатели наблюдаются зимой: 0.104 (355 нм) и 0.037 (532 нм). Сезонные вариации демонстрируют снижение концентрации аэрозолей осенью по сравнению с весенним периодом, что объясняется совместным действием метеорологических факторов: выносом накопленных частиц и интенсивным осаждением аэрозолей с атмосферными осадками. Повышенные концентрации аэрозолей в весенне-летний период связаны с интенсификацией конвекционных процессов в прогревающемся планетарном пограничном слое. Систематическое превышение показателей АОТ, полученных лидарным комплексом, над данными солнечного фотометра, даже с учётом слепой зоны лидара, свидетельствует о существенном вкладе локальных антропогенных источников в загрязнение атмосферы города. Высота аэрозольного слоя в Санкт-Петербурге достигает 2000 м, тогда как в Выборгском районе не превышает 1200 м. Концентрационные профили демонстрируют значительно более низкое содержание аэрозольных частиц на всех высотах зондирования в Выборгском районе по сравнению с городской территорией. Полученные результаты подтверждают необходимость специализированного мониторинга аэрозольного загрязнения именно в урбанизированных экосистемах для разработки эффективных природоохранных мероприятий.

Проведенный эксперимент по изучению воздействия гуминовых кислот на водные экосистемы выявил комплексное влияние на физиолого-биохимические процессы микроводорослей *Chlorella vulgaris*. Установлены значительные изменения кинетики роста культуры, сопровождающиеся модификацией оптических характеристик суспензий и морфометрических параметров клеток. Наиболее выраженным эффектом стало резкое снижение концентрации растворенного кислорода на 5-е сутки эксперимента, особенно выраженное в световых условиях, что стимулировало развитие водоросли. Данный

результат может быть обусловлен комплексообразованием гуминовых веществ с растворенным кислородом, их антиоксидантными свойствами, стимуляцией фотосинтетической активности и обеспечением дополнительного источника органического углерода. Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки методологии мониторинга водных экосистем в рамках карбонового полигона «Ладога», оценке влияния почвенного стока на продуктивность водоемов, моделирования трансформации углерода в системе «водосбор-водоем» и разработки критериев экологического состояния водных объектов.

Проведенные лабораторные эксперименты продемонстрировали перспективность использования пресноводных раков *P. leptodactylus* в качестве биоиндикаторов для мониторинга солоноватых вод. Установлено, что данный вид сохраняет стабильный физиологический статус при солености до 6.5% в течение минимум двух месяцев, что регистрировалось методом неинвазивного мониторинга кардиоактивности. Показатели кардиоритма доказали свою эффективность как интегральный индикатор физиологического состояния и стресс-реакции животных. Полученные результаты обосновывают возможность применения раков в качестве биосенсоров в биоэлектронных системах мониторинга, что особенно актуально для реализации климатических проектов, связанных с изучением "голубого" углерода в прибрежных экосистемах. Разработанный метод открывает новые перспективы для экологической оценки состояния переходных водных систем в контексте изменения климата.

Проведенный финансово-экономический анализ выявил системные дисбалансы в институциональной среде регулирования декарбонизации естественно-монопольных секторов России, где сохраняющаяся зависимость теплоэнергетики от государственной поддержки и тарифного регулирования ограничивает инвестиционный потенциал и мотивацию компаний к модернизации. Для достижения целей углеродной нейтральности необходимы комплексные институциональные преобразования, обеспечивающие синхронизацию реформы естественных монополий, политики энергоэффективности и развития рынка углеродных единиц, что соответствует международному опыту успешной декарбонизации через сочетание регуляторных, стимулирующих, информационных и финансовых инструментов. Приоритетами государственной политики должны стать создание устойчивых рыночных стимулов через тарифные механизмы, ориентированные на показатели энергоэффективности и углеродоемкости, развитие финансовых инструментов низкоуглеродного развития и формирование региональных платформ взаимодействия бизнеса, науки и власти, что позволит трансформировать декарбонизацию

в драйвер технологической модернизации на принципах энергоэффективности, конкурентоспособности и экологической ответственности.

Дальнейшие научные изыскания должны быть сконцентрированы на совершенствовании методологической базы оценки углеродного потенциала территорий карбонового полигона «Ладога», включая разработку усовершенствованных моделей прогнозирования секвестрации углерода и верификации методов количественной оценки потоков парниковых газов. Проведенный мониторинг экосистем Ленинградской области представляет собой значимый инструмент для анализа региональных климатических трансформаций на Северо-Западе России. Перспективное развитие карбонового фарминга в регионе способно внести существенный вклад в глобальные усилия по смягчению последствий изменения климата через создание эффективных механизмов связывания атмосферного углерода и формирования устойчивых экосистемных услуг. Реализация указанных направлений требует интеграции междисциплинарных исследований, внедрения инновационных технологий мониторинга и создания научно-обоснованной нормативной базы для управления углеродным балансом территорий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Annual Report: Provisional State of the Global Climate 2023 [Electronic resource] // World Meteorological Organization (WMO). – URL: <https://wmo.int/files/provisional-state-of-global-climate-2023> (дата обращения: 26.07.2025).
2. World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024, WMO-No. 1368, 2025. [Electronic resource]. URL: https://wmo.int/sites/default/files/2025-03/WMO-1368-2024_en.pdf (дата обращения 26.07.2025)
3. World Meteorological Organization (WMO). WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 20: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023; WMO: Geneva, 2024. [Electronic resource]. URL: https://library.wmo.int/viewer/69057/download?file=GHG-20_en.pdf&type=pdf&navigator=1
4. Baldocchi D.D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology // Global Change Biology. – 2020. – V. 26. – № 1. – P. 242–260.
5. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. М.: ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН. 2016. 223 с.
6. Mamkin V., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J. Response of spruce forest ecosystem CO₂ fluxes to inter-annual climate anomalies in the Southern Taiga // Forests. – 2022. – V. 13. – № 1019. <https://doi.org/10.3390/f13071019>.
7. Ueyama M., Tsugumi T. A decade of CO₂ flux measured by the eddy covariance method including the COVID-19 pandemic period in an urban center in Sakai, Japan // Environmental pollution (Barking, Essex: 1987). – 2022. – V. 304. – № 119210. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119210>.
8. Min K.-E., Mun J., Perdigones B., Lee S., and Kwak K.-H. Insights on estimating urban CO₂ emissions using eddy-covariance flux measurements // Atmos. Chem. Phys. Discuss. – 2022. [preprint], <https://doi.org/10.5194/acp-2022-205>.
9. Yuan Q., Wang X., Che T., Li J. Global carbon flux dataset generated by fusing remote sensing and multiple flux networks observation // Scientific data. – 2025. – V. 12. – №1359. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05672-8>.
10. Kuricheva O.A., Maksimov A.P., Maximov T.C., Mamkin V.V., Marunich A.S., Miglovets M.N., Mikhailov O.A., Panov A.V., Prokushkin A.S., Sidenko N.V., Shilkin A.V., Lapshina E.D., Kurganova I.N., Avilov V.K., Varlagin A.V., Gitarskiy M.L., Dmitrichenko A.A., Dyukarev E.A., Zagirova S.V., Zamolodchikov D.G., Zyryanov V.I., Karelina D.V., Karsanaev S.V., Kurbatova Y.A. RuFlux: The Network of the Eddy Covariance Sites in Russia // Izvestiya

Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya. – 2023. – Vol. 87. – № 4. – P. 512-535.
<https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>

11. Каталог эколого-климатических станций России. Версия 05.2025 / под ред. Ю.А. Курбатовой, О.А. Куричевой. – 2025. – 39 с.

12. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации : Указ Президента РФ от 26.10.2023 № 812 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260001> (дата обращения: 05.09.2025).

13. Об утверждении национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года : Распоряжение Правительства РФ от 29.12.2019 № 3183-р // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201912290023> (дата обращения: 05.09.2025).

14. Об утверждении национального плана мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года : Распоряжение Правительства РФ от 11.03.2023 № 559-р // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202303110011> (дата обращения: 05.09.2025).

15. Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Аблеева В.А., Быховец С.С. Климат южного Подмосковья: современные тренды и оценка аномальности // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2017. – Т. 4. – С. 66-82. – DOI 10.21513/2410-8758-2017-4-66-82.

16. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. – Москва, 2023. – 104 стр.

17. IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. – P. 3–32. doi:10.1017/9781009157896.001.

18. IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. – P. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

19. Пестряков В.К. Почвы Ленинградской области. - ЛенинградИздат: Ленинград, 1973. -344 с.

20. Suleymanov A., Abakumov E., Nizamutdinov T., Polyakov V., Shevchenko E., Makarova M. Soil organic carbon stock retrieval from Sentinel-2A using a hybrid approach // Environ. Monit. Assess. – 2024. – Vol. 196. – Artc. 23.
21. Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Чертов О.Г. Оптимизация рекультивации нарушенных земель промышленных карьеров с использованием математической модели динамики органического вещества ROMUL // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2009. - № 11(197). - С. 1522–1526.
22. Надпорожская М.А., Быховец С.С., Низамутдинов Т.И., Моргун Е.Н., Абакумов Е.В. Анализ динамики запасов органического вещества в пахотных почвах Ямала: вычислительные эксперименты с моделью ROMUL // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. - 2024. - №. 120. - С. 48-83.
23. Naylor D., Sadler N., Bhattacharjee A., Graham E.B., Anderton C.R., McClure R., Lipton M., Hofmockel K.S., Jansson J.K. Soil Microbiomes Under Climate Change and Implications for Carbon Cycling // Annual Review of Environment and Resources. – 2020. – Vol. 45. – P. 29-59.
24. Vasar M., Davison J., Sepp S.-K., Mucina L., Oja J., Al-Quraishi S., Anslan S., Bahram M., Bueno C. G., Cantero J. J., Decocq G., Fraser L., Hiiesalu I., Hozzein Wael N., Koorem K., Meng Y., Moora M., Onipchenko V., Öpik M., Pärtel M., Vahter T., Tedersoo L., Zobel M. Global soil microbiomes: A new frontline of biome-ecology research // Global Ecology and Biogeography. – 2022. – Vol. 31(6). – P. 1120-1132.
25. Wu H., Cui H., Fu C., Li R., Qi F., Liu Z., Yang G., Xiao K., Qiao M. Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review // Science of The Total Environment. – 2024. – Vol. 909. – Artc.168627.
26. Xue P., Minasny B., McBratney A., Pino V., Fajardo M., Luo Y. Distribution of soil bacteria involved in C cycling across extensive environmental and pedogenic gradients // European Journal of Soil Science. – 2023. – Vol. 74(1). – Artc. e13337.
27. Schimel J., Schaeffer S.M. 2012. Microbial control over carbon cycling in soil // Frontiers in Microbiology. – 2012. - № 3.
28. Domeignoz-Horta L. A., Pold G., Liu X.-J.A., Frey S.D., Melillo J.M., DeAngelis K.M. 2020. Microbial diversity drives carbon use efficiency in a model soil // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11(1). – Artc. 3684.
29. Дюкарев Е.А., Семёнов С.П. Численное моделирование биогеохимических циклов углерода в болотных экосистемах // Известия АлтГУ. Математика и механика. - 2022. - № 4 (126). - С. 104-109.

30. Wang M., Zhang L. Synchronous Changes of GPP and Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in a Subtropical Evergreen Coniferous Forest // Plants. - 2023. - V.12(11). - № 2224.
31. Абакумов Е., Лемякина А., Титов В., Ващук А., Гузов Ю., Федорова И., Благих И., Достов В., Шестакова Е. Монетизация экосистемных услуг российской Арктики и оценка инвестиционных рисков // Экология и промышленность России. – 2020. - № 24(9). – С. 51-57.
32. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашки В. М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. LII. – № 5. – С. 112–119.
33. Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Atmospheric Aerosol Properties, Formation, Processes and Impacts // Chichester, UK.: Springer Publ/Praxis, 2005. – 572 p.
34. Ивлев Л.С. Механизмы образования и распада атмосферных аэрозолей и облачности и их экологическое значение // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2013. – Т. 5. – № 2. – С. 128–210.
35. Ивлев Л. С. Аэрозоли и глобальные изменения климата // Общество. Среда. Развитие. 2012. – №4. – С. 238–244.
36. Zhang Yu., Ciais P., Boucher O., Maignan F., Bastos A., Goll D., Lurton Th., Viovy N., Bellouin N. and Li L. Disentangling the Impacts of Anthropogenic Aerosols on Terrestrial Carbon Cycle During 1850–2014 // Earth’s Future. - 2021. – Vol. 9. – Iss. 7. – art. e2021EF002035.
37. Самуленков Д.А., Сапунов М.В. Исследование динамики шапки аэрозольных загрязнений в Санкт-Петербурге при переносе с разных сторон света в период с 2014 по 2021 год // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19. №. 1. – С. 277–284.
38. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2021 году. [Электронный ресурс] <https://www.infoeco.ru/index.php?id=982> (Дата обращения: 15.10.2024)
39. Macreadie P.I. The future of Blue Carbon science // Nature communications. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 3998.
40. Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах. Под редакцией А.Ф. Алимова, Н.Г. Богуцкой. – М. - СПб.: Товарищество научных изданий КМК и ЗИН РАН, 2004. – 436 с.
41. Куделькин Н.С. Проблемы сохранения биологического разнообразия. Правовая охрана морской среды Арктики от загрязнения чужеродными видами // Вестник университета имени О.Е. Кутафина (МПОА). – 2019. – №. 1. – С. 110-118

42. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов на период до 2050 года : Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202111050026> (дата обращения: 05.09.2025).

43. Дмитриева Д.М., Скobelев Д.О. Декарбонизация нефтегазового комплекса в контексте устойчивого развития: ключевые направления и возможные сценарии для Арктического региона // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2023. - № 2. – С. 7-23.

44. Горбачева Н.В. Сравнительный анализ декарбонизации экономики Сибири и Скандинавии: цена, стоимость и ценность энергии // Вопросы экономики. – 2023. – №. 10. – С. 124-148.

45. Птичников А.В., Шварц Е.А., Попова Г.А., Байбар А.С. Стратегия низкоуглеродного развития и роль лесов в ее реализации // Вестник Российской Академии Наук. – 2023. - № 93(1). - С. 48-61.

46. Fahrion G., Hesse M., Müller-Arnold B., Sauga M. Wie sich China, Europa und die USA mit Staatsgeld bekämpfen. // Der Spiegel. 35/2023. 26.08.2023.

47. Широв А.А., Колпаков А.Ю. Целевой сценарий социально-экономического развития России с низким уровнем нетто-выбросов ПГ до 2060 года // Проблемы прогнозирования. – 2023. - № 6(201). – С. 53-66.

48. Порфириев Б.Н., Широв А.А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской Академии наук. – 2022. - № 92(5), 415-423.

49. Решетников М.Г. Климатическая политика в России: наука, технологии, экономика // Проблемы прогнозирования. – 2023. - № 6(201). – С. 6-10.

50. Невзгодина Е.Л., Макарова Л.А. Предпринимательская деятельность в сфере теплоснабжения: перспективы и риски // Вестник Омского университета. Серия: Право. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 34–42.

51. Stechemesser A., Koch N., Mark E., Dilger E., Klösel P., Menicacci L., Nachtigall D., Pretis F., Ritter N., Schwarz M., Vossen H., Wenzel A. Climate policies that achieved major emission reductions: global evidence from two decades // Science. - 2024. - Vol. 385. - №6711. - P. 884-892.

52. Icos-cp.eu (2025). Integrated Carbon Observation System Official Website. [online] Available at: <https://www.icos-cp.eu/> [Accessed 14.10.2025].

53. Ameriflux.lbl.gov (2025). AmeriFlux Network Official Website. [online] Available at: <https://ameriflux.lbl.gov> [Accessed 14.10.2025].
54. Исаченко Г.А. «Окно в Европу»: история и ландшафты. СПб. СПбГУ, 1998. – 476 с.
55. Змитрович И. В. Средняя тайга Карельского перешейка: зональные, интразональные и экстразональные явления // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтования. – 2011. – № 12. – С. 54–76.
56. Чертов О.Г. Экология лесных земель. - Л. Ботанический институт им. В.Л. Комарова. –1981. - 192 с.
57. Arseniou G., MacFarlane D.W., Calders K. Accuracy differences in aboveground woody biomass estimation with terrestrial laser scanning for trees in urban and rural forests and different leaf conditions // Trees. Springer. – 2023. – Vol. 37. – № 3. – P. 761–779.
58. Parhizgar L., Pattnaik N., Yazdi H. Branch biomass allometries for urban tree species based on terrestrial laser scanning (TLS) data // Trees. Springer. – 2025. – Vol. 39. – № 4. – P. 1–16.
59. Gupta R., Sharma R.D., Verma C.L. Non-destructive mathematical models to estimate leaf area in noni (*Morinda citrifolia*) // Acta Physiol. Plant. Springer. – 2023. – Vol. 45. – № 9. – P. 109.
60. Normand F., Bissery C., Damour G., Lauri P. Hydraulic and mechanical stem properties affect leaf–stem allometry in mango cultivars // New Phytol. Wiley Online Library. – 2008. – Vol. 178. – № 3. – P. 590–602.
61. Zheng C., Guo W., Huang S. Branching pattern and branch biomass allocation of three widely used urban greening *Ficus Linnaeus* species in Southern China // Trop. Ecol. – 2025. – Vol. 66. – № 2. – P. 228–239.
62. Серебряков И.Г. Морфология вегетативных органов высших растений. Gosudarstvennoe Izd. Sovetskaiâ Nauka, 1952.
63. Цельниker Ю.Л. Рост и газообмен CO₂ у лесных деревьев. Общество с ограниченной ответственностью Международная академическая ..., 1993.
64. Антонова И.С., Барт В.А., Телевинова М.С. К вопросу о строении кроны древесного растения // Трансформация экосистем. – 2024. – Vol. 7. – № 4. – P. 50–68.
65. Shi P.-J. Li Y.R., Niinemets Ü. Influence of leaf shape on the scaling of leaf surface area and length in bamboo plants // Trees. – 2021. – Vol. 35. – № 2. – P. 709–715.
66. Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. Площадь поверхности лесных растений. Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно ..., 2008.

67. Avalos G. Specific leaf area (SLA) serves as a proxy to predict total carbon content in understory individuals of the neotropical canopy palm *Socratea exorrhiza* // Trees. Springer. – 2023. – Vol. 37. – № 6. – P. 1831–1840.
68. Calders K., Newnham G., Burt A., Murphy S., Raumonen P., Herold M., Culvenor D., Avitabile V., Disney M., Armston J. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning // Methods Ecol. Evol. Wiley Online Library. – 2015. – Vol. 6. – № 2. – P. 198–208.
69. Ribeiro D.R. Silva J.L.A., do Nascimento M.T. Leaf habits and their relationship with leaf and wood traits in tropical dry forests // Trees. Springer. – 2022. – Vol. 36. – № 1. – P. 7–24.
70. Уткин А.И. Продукционная инвариантность древостоев // Лесоведение. Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российская академия наук", 1988. – № 2. – Р. 12–23.
71. Беклемишев В.Н. Морфологическая проблема животных структур, 1925.
72. Грудзинская И.А. Семейство Ulmaceae Mirb.: систематика, география и вопросы органогенеза. диссертаци. Ленинград, 1980. – 423 р.
73. Грудзинская И.А. Об основных типах ветвления (критические заметки) // Ботан. журн. – 1974. – Vol. 59. – № 4. – P. 0–572.
74. Антонова И.С. Мультиаспектность побеговых систем некоторых деревьев умеренной зоны (разнообразие, классификация, терминология) // Актуальные проблемы современной биоморфологии. Радуга-ПРЕСС, 2012. – Р. 390–403.
75. Антонова И.С., Фатьянова Е.В. К вопросу о строении ветвей деревьев умеренной зоны в контексте онтогенетических состояний // Вестник Тверского государственного университета. Серия Биология и экология. – 2013. – Vol. 32. – № 31. – Р. 7–24.
76. Антонова И.С., Барт В.А. Зависимость строения побегов и побеговых систем от их положения в кроне *Ulmus glabra* (Ulmaceae) // Ботанический журнал. Федеральное государственное бюджетное учреждение" Российской академия наук". – 2019. – Vol. 104. – № 2. – Р. 254–268.
77. Антонова И.С., Азова О.В. Архитектурные модели кроны древесных растений // Бот. журн. – 1999. – Vol. 84. – № 3. – Р. 10–32.
78. Антонова И.С., Фатьянова Е.В. О системе уровней строения кроны деревьев умеренной зоны // Ботанический журнал. Издательство" Наука". – 2016. – Vol. 101. – № 6. – Р. 628–649.
79. Антонова И.С., Барт В.А. Строение крон древесных растений умеренной зоны на примере *Acer negundo* и *Ulmus glabra* // Бюллетень Ботанического сада-института ДВО

РАН. Учреждение Российской академии наук Ботанический сад-институт. – 2018. – № 19. – Р. 23–37.

80. Barthélémy D., Caraglio Y. Plant architecture: A dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny // Ann. Bot. – 2007. – Vol. 99. – № 3. – Р. 375–407.

81. Антонова И.С., Барт В.А. Анализ метрических характеристик двулетних побеговых систем *Acer negundo* L. в молодом генеративном состоянии // Вестник Тверского государственного университета. Серия Биология и экология. федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего. – 2016. – № 4. – Р. 151–168.

82. Pollard D.F.W. Leaf area development on different shoot types in a young aspen stand and its effect upon production // Can. J. Bot. NRC Research Press Ottawa, Canada. – 1970. – Vol. 48. – № 10. – Р. 1801–1804.

83. Yang W., Zhang X., Saudreau M. Photosynthetic capacity in “Fuji” apple trees influenced by interstocks at leaf and Canopy scale // Acta Hortic. – 2019. – Vol. 1261. – № 3. – Р. 77–84.

84. Цельниker Ю.Л., Малкина И.С. Баланс углерода ветвей ели // Лесоведение. – 1994. – № 5. – Р. 16–25.

85. Вомперский С.Э. Структура и функции лесов Европейской России/Отв. ред. ИА Утки-на; Ин-т лесоведения РАН.–Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2009.–389 с. Выход книги приурочен к 50-летию Института лесоведения РАН. Она содержит результаты исследований последних лет, 2009.

86. Корона В.В., Васильев А.Г. Строение и изменчивость листьев растений: основы модульной теории, – 2007. – 280 р.

87. Мальчевский А.С., Пукинский Ю.Б. Птицы Ленинградской области и сопредельных территорий: История, биология, охрана. – 1983. – Л., – Вып. 1. – С. 1-480.

88. Максимов А.А. Пространственно-временная динамика животного населения. Птицы и мелкие млекопитающие / (Отв.ред. А. А. Максимов). – Новосибирск, «Наука». – 1985. – 201 с.

89. Reichstein M., Camps-Valls G., Stevens B., Jung M., Denzler J., Carvalhais N., Prabhat (2019) Deep learning and process Understanding for data-driven Earth system science // Nature. – 2019. – V. 566(7743). – P.195–204.

90. Yeomans C.M., Shail R.K., Grebby S., Nykänen V., Middleton M., Lusty P.A.J. A machine learning approach to tungsten prospectivity modelling using knowledge-driven feature extraction and model confidence // Geosci Front. – 2020. – V. 11(6). – P. 2067–2081.

91. Yousefi M., Carranza E.J.M., Kreuzer O.P., Nykänen V., Hronsky J.M.A., Mihalasky M.J. Data analysis methods for prospectivity modelling as applied to mineral exploration targeting: state-of-the-art and outlook // *J Geochem Explor.* – 2021. – V. 229. – Id. 106839.
92. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // *Heliyon.* – 2020. – Vol. 6(9). – ID. e04691.
93. Haghhighizadeh A., Rajabi O., Nezarat A., Hajyani Z., Haghmohammadi M., Hedayatikhah S., Asl S.D., Aghababai Beni A. Comprehensive analysis of heavy metal soil contamination in mining environments: impacts, monitoring techniques, and remediation strategies // *Arab J Chem.* – 2024. – V. 17(6). – ID 105777.
94. Angon P.B., Islam M.S., Kc S., Das A., Anjum N., Poudel A., Suchi S.A. (2024) Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: soil, plants and human food chain // *Heliyon* – 2024. – V. 10(7). – ID. e28357.
95. Soliman N.K., Moustafa A.F. Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review // *J Mater Res Technol.* – 2020. – V. 9(5). – P. 10235–10253.
96. Barkhordari M.S., Zhou N., Li K., Qi C. Interpretable machine learning for predicting heavy metal removal efficiency in electrokinetic soil remediation // *J Environ Chem Eng.* – 2024. – V. 12(6). – ID. 114330.
97. Suleymanov A., Polyakov V., Kozlov A., Abakumov E., Kuzmenko P., Telyagissov S. Mapping of potentially toxic elements in the urban topsoil of St. Petersburg (Russia) using regression kriging and random forest algorithms // *Environ Earth Sci.* – 2023. – ID. 82.
98. Gregorutti B., Michel B., Saint-Pierre P. Correlation and variable importance in random forests // *Stat Comput.* – 2017. – V. 27(3). – P. 659–678.
99. Strobl C., Boulesteix A.-L., Zeileis A., Hothorn T. Bias in random forest variable importance measures: illustrations, sources and a solution // *BMC Bioinformatics.* – 2007. – V. 8(1). – ID. 25.
100. Rezanezhad F., Price J.S., Quinton W.L., Lennartz B., Milojevic T., Van Cappellen P. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: a review update for geochemists // *Chem Geol.* – 2016. – V. 429. – P. 75–84.
101. Yli-Halla M., Lötjönen T., Kekkonen J., Virtanen S., Marttila H., Liimatainen M., Saari M., Mikkola J., Suomela R., Joki-Tokola E. Thickness of peat influences the leaching of substances and greenhouse gas emissions from a cultivated organic soil // *Sci Total Environ.* – 2022. – V. 806. – ID. 150499.
102. Novák M., Zemanova L., Voldrichova P., Stepanova M., Adamova M., Pacherova P., Komarek A., Krachler M., Prechova E. Experimental evidence for mobility/immobility of metals in peat // *Environ Sci Technol.* – 2011. – V. 45. – P. 7180–7187.

103. Ayala Izurieta J.E., Jara Santillán C.A., Márquez C.O. Improving the remote estimation of soil organic carbon in complex ecosystems with Sentinel-2 and GIS using Gaussian processes regression //Plant and Soil. – 2022. – T. 479. – №. 1-2. – C. 159-183.
104. Castaldi F., Hueni A., Chabrillat S. Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2019. – T. 147. – C. 267-282.
105. Dvornikov Y.A., Vasenev V., Romzaykina O. Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // Geoderma. – 2021. – T. 399. – C. 115039.
106. Gavril'yuk E.A., Kuznetsova A.I., Gornov A.V. Geospatial Modeling of Nitrogen and Carbon Content and Stock in the Forest Litter Horizons Based on Sentinel-2 Multi-Seasonal Satellite Imagery // Eurasian Soil Science. – 2021. – T. 54. – C. 176- 188.
107. Suleymanov A., Gabbasova I., Komissarov M., Suleymanov R., Garipov T., Tuktarova I., Belan L. Random Forest Modeling of Soil Properties in Saline Semi-Arid Areas // Agriculture. – 2023. – T. 13. – №. 5. – ID. 976
108. Venter Z.S., Hawkins H.-J., Cramer M. Mapping soil organic carbon stocks and trends with satellite-driven high resolution maps over South Africa //Science of the Total Environment. – 2021. – T. 771. – C. 145384.
109. Gholizadeh A., Žižala D., Saberioon M., Borůvka L. Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging // Remote Sensing of Environment. – 2018. – T. 218. – C. 89-103.
110. Moritsuka N., Matsuoka K., Katsura K., Sano S., Yanai J. Soil color analysis for statistically estimating total carbon, total nitrogen and active iron contents in Japanese agricultural soils //Soil science and plant nutrition. – 2014. – T. 60. – №. 4. – C. 475-485.
111. Vodyanitskii Y.N., Savichev A.T. The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE-L* a* b //Annals of Agrarian Science. – 2017. – T. 15. – №. 3. – C. 380-385.
112. Suleymanov A., Tuktarova I., Belan L., Suleymanov R., Gabbasova I., Araslanova L. Spatial prediction of soil properties using random forest, k-nearest neighbors and cubist approaches in the foothills of the Ural Mountains, Russia //Modeling Earth Systems and Environment. – 2023. – С. 1-11.
113. Гагарина Е.И. Литологический фактор почвообразования (на примере Северо-Запада Русской равнины). Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2004.

114. Polyakov V., Abakumov E. Estimation of Carbon Stocks and Carbon Sequestration Rates in Abandoned Agricultural Soils of Northwest Russia // Atmosphere. – 2023. – Vol. 14. – Artc. 1370.
115. Rehman Z.U., Junaid M.F., Ijaz N., Khalid U., Ijaz Z. Remediation methods of heavy metal contaminated soils from environmental and geotechnical standpoints // Sci. Total Environ. – 2023. – V. 867. – Artc. 161468.
116. Zomer R.J., Bossio D.A., Sommer R., Verchot L.V. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils // Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7. – Artc. 15554.
117. Kudeyarov V.N. Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration // Eurasian Soil Sci. – 2015. -Vol. 48. – P. 923–933.
118. Kurganova I.N., de Gerenu V.O.L., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Y.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Y.V. Pilot carbon polygon in Russia: Analysis of carbon stocks in soils and vegetation // J. Soils Environ. – 2022. – Vol. 5. – Artc. e169.
119. Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Schepaschenko D.G. Integrated Approach to Spatial Assessment of Soil Organic Carbon in the Russian Federation // Eurasian Soil Sci. – 2021. – Vol. 54. – P. 325–336.
120. Zhao F., Wu Y., Hui J., Sivakumar B., Meng X., Liu S. Projected soil organic carbon loss in response to climate warming and soil water content in a loess watershed // Carbon Balance Manag. – 2021. – Vol. 16. – Artc. 24.
121. Beillouin D., Corbeels M., Demenois J., Berre D., Boyer A., Fallot A., Feder F., Cardinael R. A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene // Nat. Commun. – 2023. – Vol. 14. – Artc. 3700.
122. Winkler K., Fuchs R., Rounsevell M., Herold M. Global land use changes are four times greater than previously estimated // Nat. Commun. – 2021. – Vol. 12. – Artc. 2501.
123. Bullock E.L., Woodcock C.E. Carbon loss and removal due to forest disturbance and regeneration in the Amazon // Sci. Total Environ. – 2021. – Vol. 764. – Artc. 142839.
124. Semenov V.M., Lebedeva T.N., de Gerenu V.O.L., Ovsepyan L.A., Semenov M.V., Kurganova I.N. Pools and fractions of organic carbon in soil: Structure, functions and methods of determination // J. Soils Environ. – 2023. – Vol. 6. – Artc. e199.
125. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Tulina A.S. Mineralization of organic matter and the carbon sequestration capacity of zonal soils // Eurasian Soil Sci. – 2008. – Vol. 41. – P. 717–730.
126. Semenov V.M., Kogut B.M., Zinyakova N.B., Masyutenko N.P., Malyukova L.S., Lebedeva T.N., Tulina A.S. Biologically Active Organic Matter in Soils of European Russia // Eurasian Soil Sci. – 2018. – Vol. 51. – P. 434–447.

127. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменениях климата. 11.12.1997. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (дата обращения: 26.10.2024).

128. Khosroabadi F., Aslani A., Bekhrad K., Zolfaghari Z. Analysis of Carbon Dioxide Capturing Technologies and their technology developments // Cleaner Engineering and Technology. – 2021. – V. 5. – ID. 100279.

129. FAO. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management; FAO: Rome, Italy, - 2017; p. - 26.

130. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change // Geoderma. – 2004. – T. 123. – №. 1-2. – P. 1-22.

131. Babenko M., Bobulev A., Bokarev V. Sustainable Development of the UN and Russia // Analytical Center under the Government of the Russian Federation: Moscow, Russia. – 2016. – P. 44.

132. Bullock P. Soils in the Urban Environment; Gregory, P.J., Ed.; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 1991. - 184 p.

133. Davidson E. A., Janssens I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // Nature. – 2006. – T. 440. – №. 7081. – C. 165-173.

134. Ejarque E., Abakumov E. Stability and biodegradability of organic matter from Arctic soils of Western Siberia: insights from ¹³C-NMR spectroscopy and elemental analysis // Solid Earth. – 2016. – T. 7. – №. 1. – C. 153-165.

135. Lodygin E. D., Beznosikov V. A., Vasilevich R. S. Molecular composition of humic substances in tundra soils (¹³C-NMR spectroscopic study) // Eurasian Soil Science. – 2014. – T. 47. – C. 400-406.

136. Vasilevich R.S., Beznosikov V.A., Lodygin E.D. Molecular structure of humus substances in permafrost peat mounds in forest-tundra // Eurasian Soil Science. – 2019. – V. 52. – P. 283-295.

137. Polyakov V., Abakumov E. Stabilization of organic material from soils and soil-like bodies in the Lena River Delta (¹³C-NMR spectroscopy analysis) // Spanish Journal of Soil Science. – 2020. – T. 10. – №. 2.

138. Abakumov E.V. Accumulation and transformation of organic matter in different-aged dumps from sand quarries // Eurasian Soil Science. – 2008. – V. 41. – P. 844-851.

139. Semenov V.M., Ivannikov L.A., Tulina A.S. Stabilization of organic matter in the soil // Agrochimia. – 2009. – Vol. 10. – P. 77–96.

140. Vasilevich R., Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E. Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European Northeast Russia as climate change markers // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 615. – P. 1229-1238
141. Barbato R.A., Jones R.M., Douglas T.A., Doherty S.J., Messan K., Foley K.L., Perkins E.J., Thurston A.K., Garcia-Reyero N. Not all permafrost microbiomes are created equal: Influence of permafrost thaw on the soil microbiome in a laboratory incubation study // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2022. - № 167. – Artc. 108605.
142. Baldrian P., López-Mondéjar R., Kohout P. Forest microbiome and global change // *Nature Reviews Microbiology*. – 2023. - № 21(8). - P. 487-501.
143. Jeewani P.H., Gunina A., Tao L., Zhu Z., Kuzyakov Y., Van Zwieten L., Guggenberger G., Shen C., Yu G., Singh B. P., Pan S., Luo Y., Xu J. Rusty sink of rhizodeposits and associated keystone microbiomes // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2020. – Vol. 147. – Artc. 107840.
144. Fu Y., Luo Y., Tang C., Li Y., Guggenberger G., Xu J. Succession of the soil bacterial community as resource utilization shifts from plant residues to rhizodeposits // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2022. – Vol. 173. – Artc. 108785.
145. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Approaches and Methods for Studying Soil Organic Matter in the Carbon Polygons of Russia (Review) // *Eurasian Soil Science*. – 2022. – Vol. 55(7). – P. 849-860.
146. Pinaev A.G., Kichko A.A., Aksanova T.S., Safronova V.I., Kozhenkova E.V., Andronov E.E. RIAM: A Universal Accessible Protocol for the Isolation of High Purity DNA from Various Soils and Other Humic Substances // *Methods and Protocols*. – 2022. – Vol. 5(6). – Artc. 99.
147. Caporaso J.G., Lauber C.L., Walters W.A., Berg-Lyons D., Lozupone C.A., Turnbaugh P.J., Fierer N., Knight R. Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2011. -Vol. 108. – P. 4516-4522.
148. McMurdie P.J., Holmes S. phyloseq: An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data // *PLOS ONE*. – 2013. – Vol. 8(4). – Artc. e61217.
149. Quast C., Pruesse E., Yilmaz P., Gerken J., Schweer T., Yarza P., Peplies J., Glöckner F.O. The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools // *Nucleic Acids Research*. – 2012. – Vol. 41(D1). – P. D590-D596.

150. Parte A.C., Sardà Carbasse J., Meier-Kolthoff J.P., Reimer L.C., Göker M. List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature (LPSN) moves to the DSMZ // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2020. – Vol. 70(11). – P. 5607-5612.
151. Oksanen J., Blanchet F.G., Kindt R., Legendre P., Minchin P., O'hara R., Simpson G., Solymos P., Stevens M.H.H., Wagner H. Community ecology package // R package version. – 2018. – Vol. 2. – Artc. 5-2.
152. Bünger W., Jiang X., Müller J., Hurek T., Reinhold-Hurek B. Novel cultivated endophytic Verrucomicrobia reveal deep-rooting traits of bacteria to associate with plants // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10(1). – Artc. 8692.
153. Dash B., Nayak S., Nayak S. Verrucomicrobia // Soil: An Agricultural Perspective. – 2020. – P. 37-46.
154. Singh S., Singh S., Lukas S.B., Machado S., Nouri A., Calderon F., Rieke E.R., Cappellazzi S.B. Long-term agro-management strategies shape soil bacterial community structure in dryland wheat systems // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13(1). – Artc. 13929.
155. Glickman C.M., Virdi R., Hasan N.A., Epperson L.E., Brown L., Dawrs S.N., Crooks J.L., Chan E.D., Strong M., Nelson S.T., Honda J.R. Assessment of Soil Features on the Growth of Environmental Nontuberculous Mycobacterial Isolates from Hawai'I // Applied and Environmental Microbiology. – 2020. – Vol. 86(21). – Artc. e00121-00120.
156. Evdokimova E.V., Gladkov G.V., Kuzina N.I., Ivanova E.A., Kimeklis A.K., Zverev A.O., Kichko A.A., Aksenova T.S., Pinaev A.G., Andronov E.E. The difference between cellulolytic ‘culturomes’ and microbiomes inhabiting two contrasting soil types // PLOS ONE. – 2020. – Vol. 15(11). – Artc. e0242060.
157. Rakitin A.L., Begmatov S., Beletsky A.V., Philippov D.A., Kadnikov V.V., Mardanov A.V., Dedysh S.N., Ravin N.V. Highly Distinct Microbial Communities in Elevated Strings and Submerged Flarks in the Boreal Aapa-Type Mire // Microorganisms. – 2022. – Vol. 10(1). – Artc. 170.
158. Abakumov E. Rendzinas of the Russian Northwest: Diversity, Genesis, and Ecosystem Functions: A Review // Geosciences. – 2023. -Artc. 13.
159. Макарова М.В., Поберовский А.В., Ионов Д.В., Фока С.Ч., Косцов В.С., Поляков А.В., Имхасин Х.Х., Крель В.О., Рябушко Е.П., Абакумов Е.В., Шевченко Е.В., Микушев С.В. Исследование содержания и потоков климатически важных газов для территории Санкт-Петербурга. Сборник тезисов. Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2025), 23 – 26 июня 2025, Санкт-Петербург. С. 3.

160. Крель В.О., Абакумов Е.В., Фока С.Ч., Макарова М.В., Шевченко Е.В., Ивахов В.М. Исследование потоков CO для территории кампуса. Сборник тезисов. Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2025), 23 – 26 июня 2025, Санкт-Петербург. С. 207
161. LI-COR Biosciences. LI-7200 CO₂/H₂O Analyzer Instruction Manual. Publication. 2009. №.984 10564. 141 p.
162. LI-COR Biosciences. Eddy Covariance Processing Software (Version 7.0.8) [Software]. Available at www.licor.com/EddyPro. 2021.
163. Fratini G., Mauder M. Towards a consistent eddy-covariance processing: an intercomparison of EddyPro and TK3 // Atmospheric Measurement Techniques. – 2014. – V. 7. – P. 2273-2281.
164. Vickers D., Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 1997. – V.14. – P.512-526.
165. Mauder M., Foken T., Clement R., Elbers J. A., Eugster W., Grünwald T., Heusinkveld B., Kolle O. Quality control of CarboEurope flux data – Part 2: Inter-comparison of eddy-covariance software // Biogeosciences. – 2008. – V. 5. – P. 451-462.
166. Kljun N., Calanca P., Rotach M., Schmid H. A simple parameterization for flux footprint predictions // Boundary-Layer Meteorology. – 2004. – V. 112. – P. 503-523.
167. Zimnoch M., Godlowska J., Necki J.M., Rozanski, K. Assessing surface fluxes of CO₂ and CH₄ in urban environment: a reconnaissance study in Krakow, Southern Poland // Tellus B. – 2010. – V. 62. – P. 573-580.
168. Lopez M., Schmidt M., Ramonet M., Bonne J.-L., Colomb A., Kazan V., Laj P., Pichon J.-M. Three years of semicontinuous greenhouse gas measurements at the Puy de Dôme station (central France) // Atmos. Meas. Tech. – 2015. – V. 8. – P. 3941–3958.
169. Ueyama M., Ando T. Diurnal, weekly, seasonal, and spatial variabilities in carbon dioxide flux in different urban landscapes in Sakai, Japan // Atmos Chem Phys. – 2016. – V.16. – P. 14727–14740.
170. Makarova M.V., Arabadzhyan D.K., Foka S.C., Paramonova N.N., Poherovskii A.V., Timofeev Yu.M., Pankratova N.V., Rakitin V.S. Estimation of Nocturnal Area Fluxes of Carbon Cycle Gases in Saint Petersburg Suburbs // Russ. Meteorol. Hydrol. – 2018. – V. 43. – P. 449–455.
171. EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research): available at: <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2019&dst=CO2pc> (last access: 21 November 2019), 2018.

172. Park C., Jeong S., Park M.S., Park H., Yun J., Lee S. S., Park, S.H. Spatiotemporal variations in urban CO₂ flux with land-use types in Seoul // Carbon Balance Manage. – 2022. – V.17. – ID. 3.
173. Фока С.Ч., Макарова М.В., Абакумов Е.В., Ионов Д.В. Оценка валовой первичной продукции экосистемы Ленинградской области по данным спутниковой аппаратуры ОСО-2 // Исследование Земли из космоса. – 2025. – Т. 3. – С 36-44.
174. WMO. WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 17, 25 October 2021, ISSN 2078-0796, <https://library.wmo.int/idurl/4/58705>.
175. WMO. WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 18, 26 October 2022, ISSN 2078-0796, <https://library.wmo.int/idurl/4/58743>.
176. WMO. WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 20, 28 October 2024, ISSN 2078-0796, <https://library.wmo.int/idurl/4/69057>
177. Montzka S.A. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI); National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory, 2024. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
178. Liang A., Gong W., Han G., Xiang C. Comparison of Satellite-Observed XCO₂ from GOSAT, OCO-2, and Ground-Based TCCON // Remote Sensing. – 2017. – V. 9(10). – ID. 1033.
179. Siddans R., Knappett D., Kerridge B., Waterfall A., Hurley J., Latter B., Boesch H., Parker R. Global height-resolved methane retrievals from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) on MetOp // Atmos. Meas. Tech. – 2017. – V. 10. – P. 4135-4164.
180. Alberti C., Tu Q., Hase F., Makarova M.V., Gribanov K., Foka S.C., Zakharov V., Blumenstock T., Buchwitz M., Diekmann C., Ertl B., Frey M.M., Imhasin H.Kh., Ionov D.V., Khosrawi F., Osipov S.I., Reuter M., Schneider M., Warneke T. Investigation of spaceborne trace gas products over St Petersburg and Yekaterinburg, Russia, by using Collaborative Column Carbon Observing Network (COCCON) observations // Atmos. Meas. Tech. – 2021. – V. 15. – P. 2199–2229.
181. Sha M.K., Langerock B., Blavier J.-F.L., Blumenstock T., Borsdorff T., Buschmann M., Dehn A., De Mazière M., Deutscher N.M., Feist D.G., García O.E., Griffith D.W. T., Grutter M., Hannigan J.W., Hase F., Heikkinen P., Hermans C., Iraci L.T., Jeseck P., Jones N., Kivi R., Kumps N., Landgraf J., Lorente A., Mahieu E., Makarova M.V., Mellqvist J., Metzger J.-M., Morino I., Nagahama T., Notholt J., Ohyama H., Ortega I., Palm M., Petri C., Pollard D.F., Rettinger M., Robinson J., Roche S., Roehl C.M., Röhling A.N., Rousogenous C., Schneider M., Shiomi K., Smale D., Stremme W., Strong K., Sussmann R., Té Y., Uchino O., Velazco V.A., Vigouroux C., Vrekoussis M., Wang P., Warneke T., Wizenberg T., Wunch D., Yamanouchi S.,

Yang Y., Zhou M. Validation of methane and carbon monoxide from Sentinel-5 Precursor using TCCON and NDACC-IRWG stations // Atmos. Meas. Tech. – 2021. – V. 14. – P. 6249–6304.

182. Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Bryant G.W., Wennberg P.O., Toon G.C., Washenfelder R.A., Keppel-Aleks G., Wunch D., Yavin Y., Allen N. T., Blavier J.-F., Jiménez R., Daube B.C., Bright A.V., Matross D.M., Wofsy S.C., Park S. Total column CO₂ measurements at Darwin, Australia – site de-scription and calibration against in situ aircraft profiles // Atmos. Meas. Tech. – 2010. – V. 3. – P. 947–958.

183. Barthlott S., Schneider M., Hase F., Wiegele A., Christner E., González Y., Blumenstock T., Dohe S., García O.E., Sepúlveda E., Strong K., Mendonca J., Weaver D., Palm M., Deutscher N.M., Warneke T., Notholt J., Lejeune B., Mahieu E., Jones N., Griffith D.W.T., Velazco V.A., Smale D., Robinson J., Kivi R., Heikkinen P., Raffalski U. Using XCO₂ retrievals for assessing the long-term consistency of NDACC/FTIR data sets // Atmos. Meas. Tech. – 2015. – V. 8. – P. 1555–1573.

184. Chesnokova T.Y., Makarova M.V., Chentsov A.V., Voronina Y.V., Zakharov V.I., Rokotyan N.V., Langerock B. Retrieval of Carbon Monoxide Total Column in the Atmosphere from High Resolution Atmospheric Spectra // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2019. – V. 32(4). – P. 378-386.

185. Макарова М.В., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х., Фока С.Ч., Косцов В.С., Макаров Б.К., Поляков А.В. (2023). Определение тропосферного содержания NO₂ по наземным FTIR-измерениям прямого солнечного излучения // Оптика Атмосферы И Океана. – 2023. – Вып. 36(10). – С. 846-853.

186. Buschmann M., Deutscher N.M., Sherlock V., Palm M., Warneke T., Notholt J. Retrieval of xCO₂ from ground-based mid-infrared (NDACC) solar absorption spectra and comparison to TCCON // Atmos. Meas. Tech. – 2016. – V. 9. – P. 577–585.

187. Гинзбург А.С., Мельникова И.Н., Новиков С.С., Фролькис В.А. Простая радиационная модель безоблачной и облачной атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. – Т. 14. – №. 1. – С. 226-244.

188. Moritz R.E., Bitz C.M., Steig E.J. Dynamics of recent climate change in the Arctic // Science. – 2002. – Vol. 297. – P. 1497–1502.

189. How air pollution is destroying our health: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health> (дата обращения: 26.06.2023).

190. Marchwinska-Wyrwal E., Dziubanek G., Hajok I. The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources. Rijeka.: IntechOpen, 2011.

191. Park M., Joo H.S., Lee K. et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources // *Scientific Reports*. 2018. – Vol. 8. – art. 17007.
192. Thangavel P., Park D., Lee Y-C. Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview // *Int J Environ Res Public Health*. 2022. – Vol. 19. – No. 12. – Iss. 12. – P. 22.
193. Шабельник Е.С. Исследование влияния воздушного аэрозоля на состояние и внешний облик зданий и сооружений // Перспективные технологии в строительстве и техносферной безопасности, ИСОиП ДГТУ в г. Шахты, 2020. – С. 94—101.
194. Friedlingstein P., Cox P., Betts R., Bopp L., von Bloh W., Brovkin V., et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. // *Journal of Climate*. 2006. – Vol. 19. – Iss. 14. – P. 3337–3353.
195. Mercado L. M., Bellouin N., Sitch S., Boucher O., Huntingford C., Wild M., & Cox P. M. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink // *Nature*. – 2009. – Vol. 458. – P. 1014–1017.
196. Kanniah K. D., Beringer J., Tapper N. J., & Long C. N. Aerosols and their influence on radiation partitioning and savanna productivity in northern Australia // *Theoretical and Applied Climatology*. 2010. – Vol. 100. – Iss. 3-4. – P. 423–438.
197. Roderick M. L., Farquhar G. D., Berry S. L., & Noble I. R. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation // *Oecologia*. 2001. – Vol. 129. – Iss. 1. – P. 21–30.
198. Alton P. B., North P. R., & Los S. O. The impact of diffuse sunlight on canopy light-use efficiency, gross photosynthetic product and net ecosystem exchange in three forest biomes // *Global Change Biology*. 2007. – Vol. 13. – Iss. 4. – P. 776–787.
199. Alton P. B. Reduced carbon sequestration in terrestrial ecosystems under overcast skies compared to clear skies // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. – Vol. 148. – Iss. 10. – P. 1641–1653.
200. Key J. R., & Schweiger A. J. Tools for atmospheric radiative transfer: Streamer and FluxNet // *Computers & Geosciences*. 1998. – Vol. 24. – Iss. 5. – P. 443–451.
201. Zhang Y., Goll D., Bastos A., Balkanski Y., Boucher O., Cescatti A., et al Increased global land carbon sink due to aerosol-induced cooling // *Global Biogeochemical Cycles*. 2019. – Vol. 33. – Iss. 3. – P. 439–457.
202. Jones C. D., Cox P. M., Essery R. L., Roberts D. L., & Woodage M. J. Strong carbon cycle feedbacks in a climate model with interactive CO₂ and sulphate aerosols // *Geophysical Research Letters*. 2003. – Vol. 30. – Iss. 9. – art. 1479.

203. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей // издательство Ленинградского университета, 1982. – 366 с.
204. Итоги социально-экономического развития Санкт-Петербурга, 2022.
205. Прогноз социально-экономического развития Санкт-Петербурга на 2022 год и плановый период 2023 и 2024 годов.
206. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2022 году.
207. Романовская А.Ю., Савин И.Ю. Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. – Вып. 109. – С. 36–95.
208. Benson R.F. and Blyholder G.D. Adsorption Of Several Atmospheric Polluting Gases Upon Dehydrated Gypsum // Florida Scientist. 1993. – Vol. 56. – No. 2. – p. 98–108.
209. Pilot M.J. Application of Gas-Aerosol Adsorption Data to the Selection of Air Quality Standards // Journal of the Air Pollution Control Association. 1968. – Vol. 18. – Is. 11. – p. 751–753.
210. Pokrovskiy V.A., Bogillo V.I., Dabrowski A. Adsorption and chemisorption of organic pollutants on solid aerosol surfaces // Studies in Surface Science and Catalysis. – 1999. – Vol. 120. – P. 571–634.
211. Ивлев Л.С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосферы и океана. 2011. – Т. 24. – №. 5. – С. 392–410
212. Liang Y., Che H., Wang H. et al. Aerosols Direct Radiative Effects Combined Ground-Based Lidar and Sun-Photometer Observations: Cases Comparison between Haze and Dust Events in Beijing // Remote Sensing. 2022. – Vol. 14. – No. 2. – 18 p. art. 266.
213. Ma X., Wang C., Han G. et al. Regional Atmospheric Aerosol Pollution Detection Based on LiDAR Remote Sensing // Remote Sensing. 2019. – Vol. 11. – No. 20. – art. 2339.
214. Liu B., Ma Y., Gong W. et al. Comparison of AOD from CALIPSO, MODIS, and Sun Photometer under Different Conditions over Central China // Scientific Reports. 2018. – Vol. 8. – art. 10066.
215. Kong D., He H., Zhao J., Ma J. and Gong W. Aerosol Property Analysis Based on Ground-Based Lidar in Sansha, China // Atmosphere. 2022. – Vol. 13. – art. 1511.
216. Балин Ю. С., Коханенко Г. П., Клемашева М. Г., Пеннер И. Э., Насонов С. В., Самойлова С. В., Чайковский А. П. «ЛОЗА-С» – базовый лидар российского сегмента лидарных станций сети СНГ (CIS LiNet). // Оптика атмосферы и океана. 2017. – Т. 30. – №. 12. – С. 1065–1068.

217. Kokhanenko G. P., Balin Y S., Klimkin A. V., Novoselov M M., Zhang S. Mapping aerosol pollution over the city using a scanning lidar //27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 2021, 119163Y.
218. Xiao D., Wang N., Chen S., Wu L., Müller D., Veselovskii I., Li Che., Landulfo E., Sivakumar V., Li J., Che H., Fang J., Zhang K., Wang B., Chen F., Hu X., Li X., Li W., Tong Y., Ke J., Wu L., Liu Ch., Liu Do. Simultaneous profiling of dust aerosol mass concentration and optical properties with polarized high-spectral-resolution lidar // Science of The Total Environment. 2023. – Vol. 872. – P. 162091.
219. Веселовский И. А. Дистанционная лазерная диагностика аэрозольных и газовых составляющих атмосферы методами романовского и упругого рассеяния: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2005. – 391 с.
220. Veselovskii I., Whiteman D.N., Kolgotin A., Andrews E., Korenskii M. Demonstration of aerosol property profiling by multi-wavelength lidar under varying relative humidity conditions // J. of Atmospheric and Oceanic Tech. 2009. – Vol. 26. – P. 1543–1557.
221. Колготин А. В. Методика решения задач многоволнового лидарного зондирования в применении к глобальному мониторингу параметров атмосферных аэрозолей: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 2014. – 211 с.
222. Chaikovsky A., Ivanov A., Balin Yu., Elnikov A., Tulinov G., Plusnin I., Bukin O., Chen B. Lidar network CIS-LiNet for monitoring aerosol and ozone in CIS regions. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2006. – Vol. 6160. – art. 616035.
223. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Y.B., Sanotskaya N.A. Lidar Measurements of Atmospheric Aerosols // 25th International Laser Radar Conference, 2020.
224. Ke, J., Sun, Y., Dong, C. et al. Development of China's first space-borne aerosol-cloud high-spectral-resolution lidar: retrieval algorithm and airborne demonstration // PhotoniX. – 2022. – Vol. 3. – N. 17.
225. Huang, X., Yang, X., Geng, F., Zhang, H., He, Q., & Bu, L. Aerosol Measurement and Property Analysis Based on Data Collected by a Micro-pulse LIDAR over Shanghai, China // Journal of the Optical Society of Korea. – 2010. – Vol. 14. – No. 3. – P. 185–189.
226. Dang R., Yang Y., Hu X-M., Wang Z., Zhang S. A Review of Techniques for Diagnosing the Atmospheric Boundary Layer Height (ABLH) Using Aerosol Lidar Data // Remote Sensing. – 2019. – No.11. – Iss. 13. – art. 1590.
227. Esselborn M., Wirth M., Fix A., Tesche M., Ehret G. Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients // APPLIED OPTICS. – 2008. – Vol. 47. – No. 3. – p. 346–358.

228. Aggarwal M., Whiteway J., Seabrook J., Gray L., Strawbridge K., Liu P., O'Brien J., Li Sh.-M., McLaren R. Airborne lidar measurements of aerosol and ozone above the Canadian oil sands region // *Atmos. Meas. Tech.* – 2018. – Vol. 11. – p. 3829–3849.
229. Voss K.J., Welton E.J., Quinn P.K., Johnson J., Thompson A.M., Gordon H.R. Lidar measurements during Aerosols99 // *Journal Of Geophysical Research.* – 2001. – Vol. 106. – No. D18. – p. 20,821–20,831.
230. Barnes J., Pipes R., Sharma N.C.P. Measuring Aerosol Optical Depth (AOD) and Aerosol Profiles Simultaneously with a Camera Lidar // *EPJ Web of Conferences.* – 2016. – Vol. 119. – art. 02007.
231. Münkel Ch., Emeis S., Müller W.J., Schäfer K. Aerosol concentration measurements with a lidar ceilometer: results of a one year measuring campaign // *Proc. of SPIE.* – 2004. – Vol. 5235. – p. 486–496.
232. Mamouri R.-E., Ansmann A. Potential of polarization lidar to provide profiles of CCN- and INP-relevant aerosol parameters // *Atmos. Chem. Phys.* – 2016. – Vol. 16. – p. 5905–5931.
233. Welton E., Stewart S., Lewis J., Belcher L., Campbell J. and Lolli S. Status of the NASA Micro Pulse Lidar Network (MPLNET): overview of the network and future plans, new version 3 data products, and the polarized MPL // *EPJ Web of Conferences.* – 2018. – Vol. 176. – art. 09003.
234. Nishizawa T., Sugimoto N., Matsui I., Shimizu A., Higurashi A., and Jin Y. The Asian Dust and Aerosol Lidar Observation Network (AD-NET): Strategy and Progress // *EPJ Web of Conferences.* – 2016. – Vol. 119. – art. 19001.
235. Hoff R.M., McCann K.J., Demoz B., Reichard J., Whiteman D.N., McGee T., McCormick M.P., Philbrick C.R., Strawbridge K., Moshary F., Gross B., Ahmed S., Venable D., Joseph E. Regional East Atmospheric Lidar Mesonet: REALM // ILRC, European Space Agency (ESA). – 2002. – P. 1–4.
236. Xun L., Lu H., Qian C., Zhang Y., Lyu S., Li X. Analysis of Aerosol Optical Depth from Sun Photometer at Shouxian, China // *Atmosphere.* – 2021. – Vol. 12. – Iss. 9. – art. 1226.
237. Calinoiu D. G., Trif-tordai G., Ionel I., Cioabla A.E. Sun Photometer – Remote Sensing For Aerosol assessment // *Journal of Environmental Protection and Ecology.* – 2018. – Vol. 19. – Iss. 2. – P. 462–470.
238. Sugimoto N., Nishizawa T., Shimizu A., Matsui I. Aerosol characterization with lidar methods // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.* – 2014. – Vol. 9232. – P. 117–122.

239. Wang L., Macak MB, Stanic S., Bergant K., Gregoric A., Drinovec L., Mocnik G., Yin Z., Yi Y., Müller D., Wang X. Investigation of Aerosol Types and Vertical Distributions Using Polarization Raman Lidar over Vipava Valley // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – Iss. 14. – art. 3482.
240. Khor W. Y., Hee W. Sh., Tan F., Lim Hw. S., Mat. Jafri M. Z., Holben B. Comparison of Aerosol optical depth (AOD) derived from AERONET sunphotometer and Lidar system // IOP Conference Series: Earth, Environmental Science. – 2014. – Vol. 20. – Iss. 1. – art. 012058.
241. Kafle D. N., Coulter R. L. Micropulse lidar-derived aerosol optical depth climatology at ARM sites worldwide // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2013. – Vol. 118. – Iss. 13. – P. 7293–7308.
242. Fang Zh., Yang H., Zhao M., Cao Y., Li Ch., Xing K., Deng X., Xie Ch. & Liu D. Assessing PM2.5, Aerosol, and Aerosol Optical Depth Concentrations in Hefei Using Modis, Calipso, and Ground-Based Lidar // Journal of Applied Spectroscopy. – 2021. – Vol. 88. – P. 794–801.
243. Волкова К.А., Поберовский А.В., Тимофеев, Ю.М., Ионов Д.В., Holben B.N., Smirnov A., Slutsker I. Аэрозольные оптические характеристики по данным измерений солнечного фотометра CIMEL (AERONET) вблизи Санкт-Петербурга // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31. – №. 6. – С. 425–43.
244. Zhang W., Gu X., Xu H., Yu T. and Zheng F. Assessment of OMI near-UV aerosol optical depth over Central and East Asia // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2016. – Vol. 121. – P. 382–398.
245. Sinyuk A., Holben B.N., Eck T.F., Giles D.M., Slutsker I., Korkin S., Schafer J.S., Smirnov A., Sorokin M. and Lyapustin A. The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2 // Atmospheric Measurement Techniques. – 2020. – Vol. 13 – Iss. 6. – P. 3375–3411.
246. Донченко В.К., Самуленков Д.А., Мельникова И.Н. и др. Лазерные системы Ресурсного центра СПбГУ. Возможности, постановка задач и первые результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №. 3. – С. 122–132.
247. Klett J.D. Lidar Inversion with Variable Backscatter/Extinction Ratios // Applied Optics. – 1985. – Vol. 24. – Iss. 11. – P. 1638–1643.
248. Guerrero-Rascado J. L., João Costa M., Bortoli D., Silva A. M., Lyamani H. and Alados-Arboledas L. Infrared lidar overlap function: an experimental determination // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – Iss. 19. – P. 20350–20369.

249. Halldórsson T., Langerholc J. Geometrical form factors for the lidar function // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17. – Iss. 2. – P. 240–244.
250. Filonchyk M., Peterson M., Yan H., Yang Sh., Chaikovsky A. Columnar optical characteristics and radiative properties of aerosols of the AERONET site in Minsk, Belarus // Atmospheric Environment. – 2021. – Vol. 249. – Iss. 15. – art. 118237.
251. Chubarova N., Vogel H., Androsova E., Kirsanov A., Popovicheva O., Vogel B. and Rivin G. Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 22. – Iss. 16. – P. 10443–10466.
252. Волков Н.Н. Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозоля: методика расчета параметров и анализа данных: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИИГАиК, 2013. – 135 с.
253. Самуленков Д.А., Сапунов М.В. Аэрозольные загрязнения над г. Санкт-Петербургом в разные сезоны по результатам лидарных измерений с 2014 по 2022 год // Экология и промышленность России – 2023. – Т. 27, №. 9. – С. 61-65.
254. Белан Б.Д. Распространение примесей в атмосфере и методы их контроля / Б.Д. Белан, Г.Г. Журавлев, Г.О. Задде, В.А. Попов - Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 342 с.
255. Самуленков Д.А., Сапунов М.В. Исследование содержания аэрозолей лидарным методом в Выборгском районе Ленинградской области и г. Санкт-Петербург. // Гидрометеорология и экология – 2023. – №. 73. – С. 653-665.
256. Taneja K., Attri S.D., Ahmad Sh. et al. Comparative assessment of aerosol optical properties over a mega city and an adjacent urban area in India. // Mausam – 2017. – Vol. 68. – P. 673-688.
257. Жданова Е.Ю., Чубарова Н.Е. Пространственная изменчивость аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона по спутниковым и наземным данным. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2018. – Т. 15. №. 7. – С. 236-248.
258. Chubarova N.Y., Sviridenkov M.A., Smirnov A., Holben B.N. Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects. // Atmospheric Measurement Techniques – 2011. – Vol. 4. No. 2. – P. 367-378.
259. Зуев В.Е., Макиенко Э.В., Нац И.Э. Определение оптических свойств стратосферных аэрозолей наземными лидарами // Доклады Академии наук. – 1982. – Т. 265. – №. 5. – С. 1105–1107.

260. Wang J. and Christopher S.A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM_{2.5} mass: Implications for air quality studies. // Geophysical Research Letters. – 2003. – Vol. 30. – Iss. 21.
261. Chudnovsky A.A., Lee H.J., Kostinski A., Kotlov T. and Koutrakis P. Prediction of daily fine particulate matter concentrations using aerosol optical depth retrievals from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2012. – Vol. 62. – Iss. 9. – P. 1022–1031.
262. Donkelaar van A., Martin R.V., Brauer M. and Boys B.L. Use of Satellite Observations for Long-Term Exposure Assessment of Global Concentrations of Fine Particulate Matter. // Environmental Health Perspectives. – 2015. – Vol. 123. – Iss. 2. – P. 135–143.
263. Zhdanova E.Y., Chubarova N.Y., and Lyapustin A.I. Assessment of urban aerosol pollution over the Moscow megacity by the MAIAC aerosol product. // Atmospheric Measurement Techniques. – 2020. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 877–891.
264. Deng X., Tie X., Wu D. et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta Region (PRD). // Atmospheric Environment. – 2008. – Vol. 42. – Iss. 7. – P. 1424–1435.
265. Zhang Y., Zhu X., Slanina S. Aerosol pollution in some Chinese cities (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. – 2004. – Vol. 76. – No. 6. – P. 1227-1239.
266. Cash J.M., Marco Ch.Di, Langford B. et al. Response of organic aerosol to Delhi's pollution control measures over the period 2011–2018. // Atmospheric Environment. – 2023. – Vol. 315. – Article 120123.
267. Singh J., Payra S., Mishra M.K. et al. An analysis of particulate pollution using urban aerosol pollution index intensity over Delhi, India. // Environmental Monitoring and Assessment. – 2022. – Vol. 194. – Article 874.
268. Sicard P., Agathokleous E., De Marco A. et al. Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades. // Environmental Sciences Europe. – 2021. – Vol. 33. – Article 28.
269. Kertész Z., Shafa A., Anikó A. et al. Characterization of urban aerosol pollution before and during the COVID-19 crisis in a central-eastern European urban environment. // Atmospheric Environment. – 2024. – Vol. 318. – Article 120267.
270. Southerland V.A., Brauer M., Mohegh A. et al. Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets. // Lancet Planet Health. – 2022. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. e139-e146.

271. Morozova A.E., Sizov O.S., Elagin P.O. et al. Integral Assessment of Atmospheric Air Quality in the Largest Cities of Russia Based on TROPOMI (Sentinel-5P) Data for 2019–2020. // Cosmic Research. – 2022. – Vol. 60. – P. S57–S68.
272. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.С. и др. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири. // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – № 05. – С. 428-437.
273. Поддубный В.А., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Кабанов Д.М. Оценка влияния города на аэрозольное замутнение по данным двух точечных измерений «фон - промышленный город» // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – №4. – С. 319-326.
274. Лужецкая А.П. Оптические и микрофизические характеристики атмосферного аэрозоля на Среднем Урале по данным многолетних спектральных фотометрических измерений: автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук: 25.00.29 / Лужецкая Анна Павловна; [Место защиты: Ин-т оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН]. – Томск, 2018. – 23 с.
275. Ужегова Н.В., Антохин П.Н., Белан Б.Д. и др. Выделение антропогенного вклада в изменение температуры, влажности, газового и аэрозольного состава городского воздуха // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 7. – С. 589–596.
276. Зайцев В.Г., Островский О.В., Закревский В.И. Связь между химическим строением и мишенью действия как основа классификации антиоксидантов прямого действия // Экспериментальная и клиническая фармакология. – 2003. – Т. 66. – №. 4. – С. 66–70.
277. Улащик В.С. Активные формы кислорода, антиоксиданты и действие лечебных физических факторов. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2013. – Т. 1. – С. 60–69.
278. Соколова И.В., Чайковская О.Н. Влияние гуминовых кислот на фотопроцессы в водных средах // Вестник ТГПУ. – 2008. – Вып. 4. – №. 78. – С. 42–46.
279. Зыкова М.В., Логвинова Л.А., Кривошеков С.В., Воронова О.А., Ласукова Т.В., Братишко К.А., Жолобова Г.А., Голубика О.А., Передерина И.А., Дрыгунова Л.А., Тверяков Е.Н., Белоусов М.В. Антиоксидантная активность высокомолекулярных соединений гуминовой природы // Химия растительного сырья. – 2018. – № 3. – С. 239–250.
280. Kulikova N.A., Perminova I.V., Badun G.A., Chernysheva M.G., Koroleva O.V., Tsvetkova E.A. Estimation of Uptake of Humic Substances from Different Sources by Escherichia coli Cells under Optimum and Salt Stress Conditions by Use of Tritium-Labeled Humic Materials // Applied and environmental microbiology. – 2010 – Vol. 76. – No. 18. – p. 6223–6230.

281. Кнорре Д.А., Фенюк Б.А., Попова Е.Н., Лямзаев К.Г., Черняк Б.В. Структура и функции митохондрий [Электронный ресурс] // Конспект лекций, Факультет биоинженерии и биоинформатики МГУ имени М.В. Ломоносова. – 2019. – С. 118. Режим доступа: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/the-structure-and-function-of-mitochondria-M1.pdf>
282. Cadenas E. Basic mechanisms of antioxidant activity // BioFactors. – 1997. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 391–397.
283. Сыровая А.О., Леонтьева Ф.С., Новикова И.В., Иванникова С.В. Биологическая роль свободных радикалов в развитии патологических состояний // Международный медицинский журнал. – 2012. – No. 3. – С. 98–103.
284. Дину М.И., Шкинев В.М. Комплексообразование ионов металлов с органическими веществами гумусовой природы: методы исследования и структурные особенности лигандов, распределение элементов по формам // Геохимия. – 2020 – Т. 65. – Тщ.2. – С. 165–177.
285. Хасанов В.В., Рыжова Г.Л., Мальцева Е.В. Методы исследования антиоксидантов // Химия растительного сырья. – 2004. – No. 3. – С. 63–75.
286. Скрипкина Т.С. Механохимическая модификация структуры гуминовых кислот для получения комплексных сорбентов: дисс. ... канд. хим. наук: 02.00.21 – Новосибирск. – 2018. – 124 с.
287. Чуков С.Н. Структурно-функциональные параметры органического вещества почв в условиях антропогенного воздействия. – СПб.: изд. СПбГУ, 2001. – 216 с.
288. Логвинова Л.А. Физико-химические и кардиотропные свойства гуминовых кислот низинного древесно-травяного торфа: дисс. ... канд. фарм. наук: 14.04.02. – Томск. – 2019. – 243 с.
289. Горшкова О.М., Пацаева С.В., Федосеева Е.В., Шубина Д.М., Южаков В.И. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды // Вода: химия и экология. – 2009. – No. 11. – Iss. 17. – С. 31–37.
290. Zykova M.V., Schepetkin I.A., Belousov M.V., Krivoshchekov S.V., Logvinova L.A., Bratishko K.A., Yusubov M.S., Romanenko S.V., Quinn M.T. Physicochemical characterization and antioxidant activity of humic acids isolated from peat of various origins // Molecules. – 2018 – Vol. 23. – Iss. 4. – art. 753
291. Винберг Г.Г. Пути количественного изучения потребления и усвоения пищи водными животными // Журн. общ. биол. – Т.25. – No. 4. – С.254–266
292. Федураев П.В. Участие пероксида водорода в передаче сигнала холодового стресса в клетках цианобактерии *Synechocystis*: дис. ... канд. биол. наук: 03.01.05. – Москва – Калининград. – 2018. – 90 с.

293. Шубина Д.М., Якименко О.С., Пацаева С.В., Изосимов А.А., Терехова В.А., Федосеева Е.В., Южаков В.И. Спектральные свойства водных растворов промышленных гуминовых препаратов // Вода: химия и экология. – 2010. – №. 2. – С. 22–26.
294. Шубина Д.М., Якименко О.С., Пацаева С.В., Изосимов А.А., Терехова В.А., Федосеева Е.В., Южаков В.И. Спектральные свойства водных растворов промышленных гуминовых препаратов (продолжение) // Вода: химия и экология. – 2010. – №. 3. – С. 21–25.
295. Гостева О.Ю., Изосимов А.А., Пацаева С.В., Южаков В.И., Якименко О.С. Флуоресценция водных растворов промышленных гуминовых препаратов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2011. – Т. 78, №. 6. – С. 943–950.
296. Торопкина М.А., Рюмин А.Г., Кечайкина И.О., Чуков С.Н. Влияние гуминовых кислот на метаболизм *Chlorella vulgaris* в модельном опыте // Почвоведение. – 2017. – №. 11. – С. 1336–1343.
297. Rosenzweig C., Karoly D., Vicarelli M., Neofotis P., Wu Q., Casassa G., Menzel A., Root T.L., Estrella N., Seguin B., Tryjanowski P., Liu C., Rawlins S., Imeson A. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change // Nature. – 2008. – Vol. 453. – P. 353–358.
298. Sunday J.M., Bates A.E., Dulvy N.K. Thermal tolerance and the global redistribution of animals // Nat. Clim. Chang. – 2012. – Vol. 2. – Vol. 686–690.
299. Overgaard J., Kearney M.R., Hoffmann A.A. Sensitivity to thermal extremes in Australian *Drosophila* implies similar impacts of climate change on the distribution of widespread and tropical species // Glob. Chang. Biol. – 2014. – 20. – 1738–1750.
300. Kozak P., Kuklina I. Crayfish as tools of water quality monitoring // Freshwater Crayfish: A Global Overview. Boca Raton: CRS Press, 2016. – P. 275.
301. Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Sladkova S.V. et al. 2021. Industrial Operation of the Biological Early Warning System BioArgus for Water Quality Control Using Crayfish as a Biosensor // Water Science and Sustainability. Sustainable Development Goals Series. Cham: Springer. – P. 127.
302. McMahon B.R. The adaptable crayfish: mechanisms and physiological adaptation // Freshwater Crayfish. 1986. – Vol. 6. – P. 59–74.
303. Holdich D.M. Biology of Freshwater Crayfish // Oxford: Blackwell Science, 2002.
304. Holdich D.M., Harlioglu M.M., Firkins I. Salinity adaptations of crayfish in British waters with particular reference to *Austropotamobius pallipes*, *Astacus leptodactylus* и *Pacifastacus leniusculus* // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 1997. – Vol. 44. – P. 147.

305. Cherkashina N.Y. Distribution and biology of genus *Astacus* (Crustacea, Decapoda, Astacidae) in the Turkmen waters of Caspian Sea // Freshwater Crayfish. – 1975. – Vol. 2. – P. 553.
306. Koksal G. *Astacus leptodactylus* in Europe // Freshwater Crayfish: Biology, Management and Exploitation. London: Chapman. – 1988. – P. 365.
307. Rida R., Zein-Eddine R., Kreydiyyeh S. de Yta A. G., Saoud I. P. Influence of salinity on survival, growth, hemolymph osmolality, gill sodium potassium ATPase activity, and sodium potassium chloride co-transporter expression in the redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* // J. World Aquac. Soc. – 2021. – Vol. 52. – P. 466–474.
308. Хлебович В.В. Экология особи (очерки фенотипических адаптаций животных) // СПб.: Зоол. ин-т РАН, 2012. - 143 с.
309. Yildiz H.Y., Koksal G., Karasu Benli A.C. Physiological response of the crayfish, *Astacus leptodactylus* to saline water // Crustaceana. – 2004. – Vol. 77. No. 10. – P. 1271.
310. Попова О.С., Смурров А.О. *Paramaecia nephridiatum* – удобный объект биотестирования воды Балтийского моря // X Международный экологический форум “День Балтийского моря”. Сборник тезисов. СПб.: ООО “Макси-Принт”, 2009. – С. 196.
311. Safronova D., Lyubimtsev V., Kholodkevich S. The possibility of usage a bioelectronic system based on the control of changes in the cardioactivity of freshwater crayfish for detection of cases of instantaneous pollution of brackish waters in the eastern part of the Gulf of Finland. International Scientific Forum “Gulf of Finland – natural dynamics and anthropogenic impact” Abstracts, Russia. St. Petersburg, October 17–18, 2018 (VSEGEI). – P. 97.
312. Styrihave B., Bojsen B.H., Witthofft H., Andersen O. Diurnal variations in physiology and behaviour of the noble crayfish *Astacus astacus* and the signal crayfish *Pacifastacus leniusculus* // Marine and Freshwater Behaviour and Physiology. – 2007. – Vol. 40. No. 1. – P. 63–77.
313. Kuznetsova T.V., Sladkova S.V., Kholodkevich S.V. Evaluation of functional state of crayfish *Pontastacus leptodactylus* in normal and toxic environment by characteristics of their cardiac activity and hemolymph biochemical parameters // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. – 2010. – Vol. 46. – Iss. 3. – P. 241-250.
314. Сладкова С.В., Холодкевич С.В., Сафонова Д.В., Борисов Р.Р. Кардиоактивность раков *Cherax quadricarinatus* (von Martens 1868) в различных физиологических состояниях // Принципы экологии. – 2017. – Т. 3. – С. 40-53.
315. Бигон М., Хартер Дж., Таунсенд Дж. Экология: Особи, популяции и сообщества // М.: Мир. – 1989. – Т. 1. – 667 с.

316. Моисеенко Т. И. Водная экотоксикология. Теоретические и прикладные аспекты // М.: Наука, 2009. – 400 с.
317. Dlugosz E. M., Chappell M. A., Meek T. H., Szafrańska P., Zub K., Konarzewski M., Jones J. H., Bicudo J. E. P. W., Careau V., Garland T. Jr. Phylogenetic analysis of mammalian maximal oxygen consumption during exercise // Journal of Experimental Biology. - 2013. - Vol. 216. - Iss. 24. - P. 4712–4721.
318. Ross R., Blair S. N., Ross A., Church T.S., Després J.-P., Franklin B. A., Haskell W.L.; Kaminsky L. A., Levine, B. D. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: A case for fitness as a clinical vital sign: a scientific statement from the American Heart Association // Circulation. - 2016. - Vol. 134. - P. e653–e699.
319. Reynolds J., Souty-Grosset C. Management of Freshwater Biodiversity // Cambridge: University press, 2012. - 374 p.
320. Rovero F., Hughes R. N., Whiteley N. M., Chelazzi G. Estimating the energetic cost of fighting in shore crabs by noninvasive monitoring of heartbeat rate // Animal Behaviour. – 2000. - Vol. 59. - Iss. 4. - P. 705–713.
321. Бессонов О.А. Баланс СО₂ современной биосферы. Проблемы геоэкологии, геохимии и геофизики. Ростов н/Д., 2005. – С. 33–37.
322. Santos L., Araujo A., Fachini A. Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment // J. of Hazardous Materials. – 2010. – V. 175. P. 45–95.
323. UNESCO and HELCOM. 2017. Pharmaceuticals in the aquatic environment of the Baltic Sea region –A status report. UNESCO Emerging Pollutants in Water Series – No. 1, UNESCO Publishing, Paris.
324. Fong, P. P., & Ford, A. T. The biological effects of antidepressants on the molluscs and crustaceans: a review. Aquatic Toxicology. – 2014. – V. 151. – P. 4-13.
325. Filip Ložek , Iryna Kuklina, Kateřina Grabicová, Jan Kubec, Miloš Buříč, Tomáš Randák, Petr Císař and Pavel Kozák. Cardiac and Locomotor Responses to Acute Stress in Signal Crayfish *Pacifastacus leniusculus* Exposed to Methamphetamine at an Environmentally Relevant Concentration. // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2020. – V. 17. – 2084
326. Филенко О. Ф. Биологические методы в контроле качества окружающей среды // Экологические системы и приборы. – 2007. – № 6. – С. 18–20.
327. Iryna Kuklina, Antonín Kouba, P. Kozák. Real-time monitoring of water quality using fish and crayfish as bioindicators: A review. Environ Monit Assess. – 2013. – V. 185. – P. 5043–5053.

328. Kuznetsova T.V., Ljubimtsev V.A., Sladkova S.V., Kholodkevich S.V. Approaches to determining the reference values of functional indicators of freshwater crayfish (dacaopoda: astacidae). *InlandWaterBiology*. – 2023. – V. 16. No 5. – P. 931-938.
329. Жмур Н.С. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний. - ФР. 1.39.2007.03222. М.: Акварос, 2007.
330. Bamber SD, Depledge MH. Evaluation of changes in the adaptive physiology of shore crabs (*Carcinus maenas*) as an indicator of pollution in estuarine environments. // *Mar Biol.* – 1997. – V. 129. – No. 3. – P. 667–672.
331. Udalova, G.P.; Khodasevich, S.V.; Sladkova, S.V.; Ivanov, A.V.; Rymsha, V.A. Study of circadian activity in the crayfish *Pontastacus leptodactylus* during their multimonth maintenance in the river water flow. // *J. Evol.Biochem. Physiol.* – 2009. – V. 45. – P. 372–381.
332. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis. World Resources Institute, Washington, USA. – 2005. – P. 88.
333. CIESM. Report of the Joint CIESM/ICES Workshop on Mnemiopsis Science. Coedited by S. Pitois and T. Shiganova. – A Coruña, Spain, 2015. – P. 80.
334. Дудакова Д.С., М.О. Дудаков, Е.А. Курашов, В.М. Анохин. Вселение дрейссены полиморфной (*Dreissena polymorpha* (pallas 1771), *Dreissenidae*) в ладожское озеро. // Зоологический журнал. – 2021. – Т. 100. – №. 4. – С. 363-373.
335. Carlton J. T. and Geller J. Ecological roulette: the global transport of nonindigenous marine organisms // *Science*. – 1993. – Vol. 261. – P. 78-82.
336. Gonçalves A.A. Bioinvasion through ballast water: global concern. // *Journal of Ocean Technology*. – 2013. – No. 8. – P. 88-118.
337. Алимов А.Ф., Орлова М.И., Панов В.Е. Последствия интродукции чужеродных видов для водных экосистем и необходимость мероприятий по их предотвращению // Виды вселенцы в европейских морях. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН. – 2000. – С.12-23.
338. Руководство по применению требований международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлению ими 2004 года. – СПб: Изд-во Российского морского регистра судоходства, 2017. – 61 с.
339. Marine Environment Protection Committee (MEPC). Procedure for Approval of Ballast Water Management Systems that Make Use of Active Substances(G9). MEPC70/18/Add. 1. ANNEX5 Resolution MEPC. 279(70). 2005.
340. Андрюшечкин Ю.Н., Столповский Д.Ю., Рудых С.В. Анализ технических характеристик при выборе систем обработки балластных вод для судов «река-море»

плавания // Вестник ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. – 2018. – Т. 10. – №. 6. – С. 1191–1199.

341. Hoigné J Chemistry of aqueous ozone and transformation of pollutants by ozonation and advanced oxidation processes. In: Hubrec J (ed) The handbook of environmental chemistry quality and treatment of drinking water. – Springer-Verlag, Berlin, 1998. – P. 83–141.

342. Matthias Wietz 1, Michael R Hall, Lone Høj. Effects of seawater ozonation on biofilm development in aquaculture tanks. // Syst Appl Microbiol. – 2009. – Vol. 32. – No. 4. – P. 266–277.

343. Herwig R.P. Cordell J.R., Perrins J.C., Dinnel P.A., Gensemer R.W., Stubblefield W.A., Ruiz G.M., Kopp J.A., House M.L. and Cooper W.J. Ozone Treatment of Ballast Water on the Oil Tanker S/T Tonsina: Chemistry, Biology, and Toxicity. Marine Ecology Progress Series. – 2006. – Vol. 324. – P. 37–55.

344. Shah A.D.; Liu Z.Q.; Salhi E.; Hoefer T.; Werschkun B.; Von Gunten U. Formation of disinfection by-products during ballast water treatment with ozone, chlorine, and peracetic acid: Influence of water quality parameters. // Environ. Sci. Water Res. Technol. – 2015. – Vol. 1. – P. 465–480.

345. Perrins J.C., Cooper W.J., van Leeuwen J. (Hans), Herwig R.P. Ozonation of seawater from different locations: Formation and decay of total residual oxidant – implications for ballast water treatment. // Marine Pollution Bulletin. – 2006. – Vol. 52. – P. 1023–1033.

346. Von Gunten U. and Hoigné J. Bromate Formation during Ozonation of Bromide-Containing Waters: Interaction of Ozone and Hydroxyl Radical Reactions. Environmental Science & Technology. – 1994. – Vol. 28. – No. 7. – P. 1234–1242.

347. Gonçalves A.A., G.A. Gagnon. Recent Technologies for Ballast Water Treatment. // Ozone: Science & Engineering. – 2012. – Vol. 34. – No. 3. – P.174–95.

348. Жадин В.И. Методы гидробиологического исследования. – М.: Высшая школа, 1960. – 161 с.

349. ГОСТ 31960-2012. Вода. Методы определения токсичности по замедлению роста морских одноклеточных водорослей *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin и *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 40 с.

350. Маркина Ж. В., Айздейкер А. *Dunaliella salina* (Chlorophyta) как тест-объект для оценки загрязнения морской среды детергентами. // Биология моря – 2005. – Т. 31. – С. 274–279.

351. ФР 1.39.2006.0250. ПНД Ф Т 14.1:2.14-06 Т 16.1:3.11-06. Методика определения токсичности высокоминерализованных поверхностных и сточных вод, почв и отходов по выживаемости солоноватоводных раков *Artemia salina* L.

352. ГОСТ Р 57163 - 2016 Вода. Определение токсичности по выживаемости односуточной молоди рыб Poecilia reticulata Peters в пресной и морской воде.

353. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей.- ФР. 1.39.2007.03223. М. Акварос, 2007.

354. Башмаков И.А. Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // Вопросы экономики. – 2020. – № 7. – С. 51–74.

355. Башмаков И.А. Прогнозы развития энергетики мира 30 лет спустя: проверка прошлым уроков будущего // Вопросы экономики. – 2022. – №5. – С. 51-78.

356. Мельник А., Наумова И., Ермолаев К. Трансформация управления инновационным развитием для решения проблем декарбонизации и роста энергоэффективности // Форсайт. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 51-66.

357. Нефть запретить нельзя добывать [Электронный ресурс] // Информбюро. – 2022. – URL: <https://informburo.kz/stati/neft-zapretit-nelzya-dobyvat-pochemu-provalilsya-klimaticheskij-sammit> (дата обращения: 05.09.2025).

358. Постановление Правительства Сахалинской области от 28.11.2022 №551. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/6500202211300003?ysclid=lei82duoq0241973427> (дата обращения: 13.11.2023).

359. Lenain P. Inflation Reduction Act vs. Green Deal: Transatlantic Divergences on the Energy Transition. Council on Economic Policies, 2023. URL: <https://www.cepweb.org/inflation-reduction-act-vs-green-deal-transatlantic-divergences-on-the-energy-transition/> (дата обращения: 13.11.2023).

360. Ветрова М.А., Пахомова Н.В., Рихтер К.К. Стратегии развития российской энергетики в условиях климатических вызовов и geopolитической нестабильности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2023. – Т. 39. – Вып. 4.

361. Пахомова Н.В., Рихтер К.К., Ветрова М.А. Глобальные климатические вызовы, структурные сдвиги в экономике и разработка бизнесом проактивных стратегий достижения углеродной нейтральности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2022. – Т. 38. – № 3. – С. 331-364.

362. Пахомова Н.В., Заединов А.В. Энергосбережение и повышение энергоэффективности среди направлений реализации климатической политики в России // ЭКО. – 2024. - № 1. – С. 30-47.

363. Заединов А.В. Модернизация бизнес-модели климатических проектов в условиях становления российской секвестрационной индустрии // Проблемы современной экономики. – 2023. - № 2(86). – С. 202-206.

364. Djørup S., Odgaard O., Sperling K., Lund H. Consumer ownership of natural monopolies and its relevance for the green transition: The case of district heating // Energy Regulation in the Green Transition. – 2021. – P. 34-47.
365. Куричев Н.К., Птичников А.В., Шварц Е.А., Кренке А.Н. Природно-климатические проекты в России: ключевые проблемы и условия успеха // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. - № 87(4). – С. 619-636.
366. Львова Н.А. Формирование финансовой модели углеродного регулирования в контексте целей декарбонизации Российской Федерации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2024. - № 40(3). – С. 387-415.
367. Львова Н.А. (2023) Региональные углеродные рынки: поиск эффективных финансовых решений для Российской Федерации // Экономика и предпринимательство. – 2023. - № 9. – С. 555-560.
368. Makarova M.V., Abakumov E.V., Shevchenko E.V., Paramonova N.N., Pakhomova N.V., Lvova N.A., Vetrova M.A., Foka S.C., Guzov Iu.N., Ivakhov V.M., Ionov D.V., Khoroshavin A.V., Kostsov V.S., Mikushev S.V., Mikhailov E.F., Pavlovsky A.A., Titov V.O. From carbon polygon to carbon farm: The potential and ways of developing the sequestration carbon industry in the Leningrad Region and St. Petersburg // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. - 2023. – V. 68(1). - P. 82–102
369. Abakumov E., Nizamutdinov T., Zhemchueva D., Suleymanov A., Shevchenko E., Koptseva E., Kimeklis A., Polyakov V., Novikova E., Gladkov G. et al. The characterization of biodiversity and soil emission activity of the “Ladoga” carbon-monitoring site // Atmosphere. - 2024. - Vol. 15. – Artc. 420.
370. Энергетическая доктрина России до 2050 года, URL: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (дата обращения: 17.04.2025)
371. Суслов Н.И. Декарбонизация экономики мира и России: ограничения, возможности и прогнозы // ЭКО. 2025. № 2. С. 8–30.
372. Блам И.Ю., Ковалев С.Ю. Глобальный энергопереход: новые вызовы и новые возможности // ЭКО. – 2020. – № 6. – С.8-19.
373. Sun J., Wang Y., He Y., Cui W., Chao Q., Shan B., Wang Z., Yang X. The energy security risk assessment of inefficient wind and solar resources // Applied Energy. – 2024. – Vol. 360. – ID. 122889.
374. Global Energy Review 2025. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/key-findings> (accessed: 06.04.2025)

375. Правительство России (2025) Дмитрий Чернышенко: Комиссия по НТР одобрила паспорт нацпроекта «Технологическое обеспечение биоэкономики», URL: <http://government.ru/news/54487/> (дата обращения: 04.04.2025)

376. Forbes. Недооценка рисков: что не так с российской энергостратегией — 2050, URL: <https://www.forbes.ru/mneniya/535234-nedoocenka-riskov-cto-ne-tak-s-rossijskoj-energostrategiej-2050?ysclid=mabaljqfj416593250> (дата обращения: 05.05.2025)

377. Пыжев А. И., Гордеев Р. В., Зандер Е. В., Пыжева Ю. И. Углеродное регулирование как инструмент государственной политики стимулирования глубокой переработки лесного сырья в России// Журн. Сиб. федер. ун-та. Гуманитарные науки. – 2024. – Vol. 17(6). – P. 1183–1191.

378. Ракинцев Д.С. Влияние углеродного регулирования и ESG повестки на экономику России // ЭКО. – 2025. – № 1. – С. 8–22.

379. На острие гонки технологий: нацпроект по биоэкономике, URL: <https://www.fbras.ru/na-ostrie-gonki-tehnologiy-natsproekt-po-bioekonomike.html?ysclid=mae4dcgwys72574550> (дата обращения: 05.05.2025)

380. Ветрова М.А. Природные климатические проекты на основе морских экосистем: возможности и барьеры развития в РФ // Экономика устойчивого развития. – 2024. – № 2(58). – С. 51–59

381. Фишньюс. Сектору водорослей в России наметят путь развития, 2024. URL: <https://fishnews.ru/news/50848> (дата обращения: 27.02.2025)

382. Hemavathy R.V., Ragini Y.P., Shruthi S., Ranjani S., Subhashini S., Thamarai P. (2025) Biofuel production from marine macroalgae: Pathways, technologies, and sustainable energy solutions // Industrial Crops and Products. – 2025. – No. 224.

383. IEA. Global Energy Review. 2025. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/electricity#abstract> (accessed: 10.05.2025)

384. IRENA. Bioenergy & biofuels, Available at: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Bioenergy-and-biofuels> (accessed: 10.05.2025)

385. World Bioenergy Association (WBA). Global Bioenergy Statistics Report. – 2024. Available at: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/241023%20GBS%20Report%20Short%20Version.pdf> (accessed: 27.02.2025)

386. Mordor Intelligence. Анализ размера и доли рынка биотоплива – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.), URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/biofuels-market> (дата обращения: 27.02.2025)

387. IEA. Bioenergy, Available at: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy> (accessed: 04.04.2025)
388. IEA. Renewables. 2024. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/executive-summary> (accessed: 04.04.2025)
389. IEA Bioenergy. Countries' Report – update 2024, Available at: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/CountriesReport2024_final.pdf (accessed: 04.04.2025)
390. Statista. Total bioenergy capacity in Russia from 2010 to 2023, Available at: <https://www.statista.com/statistics/1154535/total-bioenergy-capacity-in-russia/> (accessed: 27.02.2025)
391. Кархова С.А. Состояние отрасли производства древесных пеллет Российской Федерации в условиях санкционных запретов // Фундаментальные исследования. – 2024. – № 7. – С. 88-94.
392. Pugazhendi A, Bajhaiya AK, Guglothu P. Biofuel production from Macroalgae: present scenario and future scope // Bioengineered. – 2021. – No.12(2). – P.9216-9238.
393. DeAngelo J., Saenz B.T., Arzeno-Soltero I.B. Economic and biophysical limits to seaweed farming for climate change mitigation // Nat. Plants. – 2023. – No.9. – P. 45–57.
394. El-Araby R. Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future // Biotechnol Biofuels. – 2024. – No. 17(129).
395. Camarena-Gómez M., Lähteenmäki-Uutela A., Spilling K. Macroalgae production in Northern Europe: Business and government perspectives on how to regulate a novel blue bioeconomy // Aquaculture. – 2022. – No. 560.
396. Ould E., Caldwell G. The potential of seaweed for carbon capture // CABI Reviews. – 2022. – No. 009.
397. García-Poza S., Pacheco D., Cotas J., Marques J., Pereira L., Gonçalves A. Marine macroalgae as a feasible and complete resource to address and promote Sustainable Development Goals (SDGs) // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2022. – No.18 (5). – P. 1148–1161.
398. ТАСС. "Лукойл" работает над технологиями для производства биотоплива из водорослей в РФ, URL: <https://tass.ru/ekonomika/19795919?ysclid=mapcconfpq432045337> (дата обращения: 15.05.2025)
399. Реестр углеродных единиц, URL: <https://carbonreg.ru/ru/registry-infos/?tab=projects> (дата обращения: 04.04.2025)
400. Башмаков И., Башмаков В., Борисов К., Дзедзичек М., Лунина А., Лебедев О., Мышак А. Движение России к углеродной нейтральности: развики на дорожных картах.

ЦЭНЭФ-XXI, 2023. URL: https://cenef-xxi.ru/uploads/Roadmaps_46ea8e9def.pdf (дата обращения: 04.04.2025)

401. Пахомова Н.В., Заединов А.В. Энергосбережение и повышение энергоэффективности среди направлений реализации климатической политики в России // ЭКО. – 2024. – № 1. – С. 30-47.

402. Брезгин В.С., Глазырина И.П. Углеродный баланс региона и климатическая политика // ЭКО. – 2023. – № 11 (593). – С. 25-42.

403. Liu S., Trevathan-Tackett S. M., Lewis C. J. E., Ollivier Q. R., Jiang Z., Huang X., Macreadie P.I. Beach-cast seagrass wrack contributes substantially to global greenhouse gas emissions // J Environ Manage. – 2019. – No. 1(231). – P. 329-335.

404. TVSPB. Петербург выделил на очистку водоемов от водорослей 19 млн рублей, URL: <https://tvspb.ru/news/2023/08/17/peterburg-vydelil-na-ochistku-vodoemov-ot-vodoroslej-19-mln-rublej> (дата обращения: 27.02.2025)

405. Научная Россия. Самый экологичный метод получения бионефти из водорослей определили российские ученые, URL: <https://scientificrussia.ru/articles/samyj-ekologicnyj-metod-poluchenija-bionefti-iz-vodoroslej-opredelili-rossijskie-ucenye> (дата обращения: 27.02.2025)

406. АгроСервер. Продажи биочара, URL: <https://agroserver.ru/b/biochar-biougol-1391329.htm> (дата обращения: 27.02.2025)

407. Hyndes G., Berdan E., Duarte C., Dugan J., Emery K., Hambäck P., Henderson C., Hubbard D., Lastra M., Mateo M., Olds A., Schlacher T. (2021) The role of inputs of marine wrack and carrion in sandy-beach ecosystems: a global review // Biological Reviews. – 2021. – No. 97(6). – P. 2127-2161.

408. Ассоциация рыбопромышленных предприятий Сахалинской области. 143 тысячи тонн морских водорослей рекомендовано добывать в водах Сахалина и Курил, URL: <https://fish-sakh.ru/news/post/808/> (дата обращения: 27.02.2025)

409. Nesterenko N., Vetrova M., Abakumov E. Comparative Assessment of the Economic Efficiency of the Afforestation Project in the North-West of Russia // Sustainability. — 2025. — Volume 17, Issue 9. — Article 4007.

410. Forest Trends' Ecosystem Marketplace. State of the Voluntary Carbon Markets 2023. Washington DC: Forest Trends Association. 2023. Available online: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/state-of-the-voluntary-carbon-market-report2023/> (accessed on 15 January 2025).

411. Группа Всемирного банка. Официальный сайт. <https://data.worldbank.org> (дата обращения 15.05.2025)

412. База данных проектов в рамках добровольных углеродных кредитов доступна по ссылке URL: <https://gspp.berkeley.edu/research-and-impact/centers/cepp/projects/berkeley-carbon-trading-project/offsets-database> Режим доступа свободный. (Дата обращения 20.12.2024)

413. Нестеренко Н.Ю., Ветровой М.А. Опыт стран БРИКС в реализации агроклиматических проектов в целях достижения углеродной нейтральности // АПК: экономика, управление. – 2025. – №10 (в печати).

414. Росстат. 2022. Окружающая среда. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 04.09.2025)

415. Заединов А.В. Устойчивое развитие российской теплоэнергетики в условиях энергоперехода // Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 2025. – 190 с.

416. Башмаков. Движение России к углеродной нейтральности: развики на дорожных картах // ЦЭНЭФ-XXI. 2023. URL: https://cenef-xxi.ru/uploads/Roadmaps_46ea8e9def.pdf (дата обращения: 20.09.2025)

417. Порфириев Б. Н., Широв А. А., Колпаков А. Ю., Единак Е. А. Возможности и риски политики климатического регулирования в России // Вопросы экономики. – 2022. – №. 1. – С. 72-89.

418. Заединов А. В. Пахомова Н. В. Особенности реализации энергоперехода в секторе естественной монополии (на примере российской теплоэнергетики) // Проблемы современной экономики. – 2024. – № 3 (91). – С. 96-101

419. Пахомова Н. В., Заединов А. В. Реформирование естественных монополий в условиях глобальных энерго-климатических рисков (на примере теплоэнергетики) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2025. – Т. 43. – № 4 (принято к публикации)

420. Мельник А., Наумова И., Ермолаев К. Трансформация управления инновационным развитием для решения проблем декарбонизации и роста энергоэффективности // Форсайт. – 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 51-66.

421. Вымятнина Ю.В., Карасева Е.К. и Слоев И.А. Опыт реформ электроэнергетики в контексте экономической теории // Экономическая политика. – 2022. – № 17(3). – С. 8-43.

422. Вымятнина Ю.В., Раскина Ю.В., Бабкина Е.А. Влияние реформы электроэнергетики в России на динамику выбросов парниковых газов: анализ методом клубной конвергенции // Экономическая политика. – 2023. – № 18(6). – С. 90-115.

423. Долматов И. А., Сасим С. В. Оценка состояния конкуренции на оптовом рынке электроэнергии // Проблемы прогнозирования. – 2022. – № 2 (191). – С. 94-104.

424. Семикашев, В.В. Перспективы развития российской энергетики в инвестиционном сценарии (газификация, энерго- и теплоснабжение). Выступление в рамках LVII сессии российско-французского семинара «Финансово-экономическая динамика в России и Европе». 2019. ИНП РАН. URL: <https://ecfor.ru/publication/perspektivy-rossijskoj-energetiki-v-investitsionnom-stsenarii/> (дата обращения: 20.09.2025)

425. Демина О. В. Регулирование теплоэнергетики в России: реакция локальных рынков // Пространственная экономика. – 2017. – № 3. – С. 62-82.

426. Стенников В. А., Пеньковский А. В. Проблемы российского теплоснабжения и пути их решения // Всероссийский экономический журнал ЭКО. – 2019. – № 9 (543). – С. 48-69.

427. Невзгодина Е. Л., Макарова Л. А. Предпринимательская деятельность в сфере теплоснабжения: перспективы и риски // Вестник Омского университета. Серия: Право. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 34–42.

428. Перевощикова М. По большим счетам: долги россиян за ЖКУ приблизились к 900 млрд рублей. Известия, 2023. URL: <https://iz.ru/1551066/mariia-perevoshchikova/robolshim-schetam-dolgi-rossiian-za-zhku-priblizilis-k-900-mlrd-rublei> (дата обращения: 27.09.2025)

429. Башкатова А. Ради коммунальных платежей некоторым россиянам приходится влезать в долги. С 1 июля тарифы на услуги ЖКХ выросли в среднем почти на 12%. Независимая газета, 2025. URL: https://www.ng.ru/economics/2025-07-17/1_9296_tariffs.html (дата обращения: 17.09.2025).

430. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2022 году // Минэкономразвития России, 2023. URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/investicionnaya_deyatelnost/povyshenie_energoeffektivnosti/gosudarstvennyy_doklad/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_energosberezeniya_i_povysheni_energeticheskoy_effektivnosti_v_rossiyskoy_federacii_za_2022_god.html?ysclid=lxszaps11k644494898 (дата обращения: 20.09.2025)

431. Ветрова М.А., Пахомова Н.В., Львова Н.А., Лемешко Н.А. Климатические проекты российского бизнеса: методология обоснования и рамочные условия успешной реализации // Вестник Санкт-Петербургского университета. – Экономика. – 2025. – Т.41. – №1. – С. 65-91.

432. Об ограничении выбросов парниковых газов : Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ (ред. от 08.12.2022) (дата обращения: 05.09.2024).

433. Реестр углеродных единиц. URL: <https://carbonreg.ru/ru/> (дата обращения: 02.09.2025)

434. Деловые Решения и Технологии. Климатические проекты: риски и возможности для бизнеса, 2022. URL: <https://delret.ru/research/klimaticheskie-proekty-riski-i-vozmozhnosti-dlya-biznesa?ysclid=mbpf5xust9872412597> (дата обращения: 02.09.2025)

435. Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р (дата обращения: 05.09.2024).

436. MSCI. Carbon Markets, 2025. URL: <https://www.msci.com/data-and-analytics/carbon-markets> (дата обращения: 06.09.2025)

437. Татнефть. Борьба с изменением климата, 2025. URL: https://www.tatneft.ru/sustainable_development/ecology/fighting_climate_change/decarbonation_strategy (дата обращения: 25.09.2025)

438. Об утверждении Методики расчета квот выбросов парниковых газов для организаций Республики Татарстан: Приказ Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан от 22.06.2021 № 697-п // Официальный портал правовой информации Республики Татарстан. (дата обращения: 05.09.2025).

439. Протокол заседания Межведомственной рабочей группы по вопросам климатической политики и планов по декабронизации Республики Казахстан от 30.03.2023 № 7110-АШ [Электронный ресурс]. (дата обращения: 05.09.2025).

440. О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации : Федеральный закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ // Официальный интернет-портал правовой информации. (дата обращения: 05.09.2024).

441. Бобылев С.Н., Пакина, А.А., Тарасова Ю.А. Низкоуглеродная повестка в региональных и корпоративных стратегиях развития // Вестник Московского университета. Серия 21. Управление (государство и общество). – 2024. – № 21(2). – С. 74-92.

442. EcosystemMarketplace. 2024 State of the Voluntary Carbon Market (SOVCM), 2024. URL: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/2024-state-of-the-voluntary-carbon-markets-sovcm/> (дата обращения: 05.09.2025)

443. Addison R., Ottimofiore G., Caputi C., Morales A. Shankar H. Towards the green transition: Stimulating investment and accelerating permits for low emissions infrastructure // OECD Working Papers on Public Governance. – 2024. – No. 68.