

Опыт мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов в прибрежной зоне моря

Б. В. Дивинский *, С. Б. Куклев, В. В. Кременецкий,
А. А. Недоспасов, В. В. Очередник, О. Н. Куклева

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

* e-mail: divin@ocean.ru

Аннотация

Цель работы – мониторинг эмиссии и поглощения углекислого газа и водяного пара на специализированном карбоновом полигоне в районе г. Геленджика Краснодарского края. Проанализированы потоки CO₂ и H₂O, а также параметры состояния атмосферы, зарегистрированные с декабря 2024 г. по май 2025 г. с помощью автоматической станции мониторинга *LI-COR Environmental*, установленной в 25 м от береговой линии. Потоки газов рассчитывались методом турбулентных пульсаций с частотой 10 Гц. Основными компонентами станции являются: датчики потоков атмосферного тепла, включая датчик фотосинтетически активной радиации; ультразвуковой анемометр; газоанализатор; датчик температуры и влажности воздуха; почвенные датчики. Применялось дневное и ночное разделение чистого потока CO₂ на валовую первичную продукцию и экосистемное дыхание. Установлено, что за указанный период на исследуемом участке с квадратного метра в атмосферу поступило около 500 г углекислого газа. При этом на экосистемное дыхание пришлось около 1300 г, на валовую продукцию – 800 г. Выявлена сезонная динамика обмена: в зимние месяцы, а также в начале календарной весны преобладает эмиссия CO₂ в атмосферу, с апреля наблюдается его усвоение экосистемой. Средняя за период наблюдений концентрация CO₂ в воздухе составила (423.2 ± 5.2) мкмоль/моль (при среднемировой в 420 мкмоль/моль). Несмотря на сложные условия расположения станции в прибрежной зоне моря, полученные результаты физически обоснованы и могут использоваться для оценок потоков парниковых газов.

Ключевые слова: карбоновые полигоны, Геленджик, поток углекислого газа, метод турбулентных пульсаций, *Li-Cor*

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания Института океанологии РАН № FMWE-2023-0001 при финансовой поддержке Фонда Мельниченко.

Для цитирования: Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А. и др. Опыт мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов в прибрежной зоне моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 1. С. 6–26. EDN PGBTAO.

© Дивинский Б. В., Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Недоспасов А. А., Очередник В. В., Куклева О. Н., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Experience in Monitoring Greenhouse Gas Emissions and Uptake in the Coastal Marine Zone

B. V. Divinsky *, **S. B. Kuklev**, **V. V. Kremenetsky**,
A. A. Nedospasov, **V. V. Ocherednik**, **O. N. Kukleva**

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

* e-mail: divin@ocean.ru

Abstract

The study aims to monitor the emissions and uptake of carbon dioxide and water vapour at a specialized carbon polygon near the city of Gelendzhik, Krasnodar Krai. The paper analyses CO₂ and H₂O fluxes along with atmospheric parameters recorded from December 2024 to May 2025 using data from an automatic LI-COR Environmental monitoring station installed 25 m from the shoreline. Gas fluxes were calculated using the eddy covariance method at a frequency of 10 Hz. The main components of the station are atmospheric heat flux sensors, including a photosynthetically active radiation sensor; an ultrasonic anemometer; a gas analyzer; an air temperature and humidity sensor; soil temperature, heat flux and moisture content sensors; and a precipitation gauge. Daytime and nighttime partitioning of the net CO₂ flux into gross primary production and ecosystem respiration was applied. The results of the experiment showed that about 500 g of carbon dioxide per square meter was emitted into the atmosphere from the study area during the specified period. Ecosystem respiration accounted for 1300 g, whereas gross primary production accounted for 800 g. Seasonal dynamics of the exchange were identified: during winter months and in early calendar spring, CO₂ emission into the atmosphere prevails, while from April onward its uptake by the ecosystem is observed. The average CO₂ concentration in the air during the observation period was $423.2 \pm 5.2 \mu\text{mol/mol}$ (with a global average of $420 \mu\text{mol/mol}$). Despite the challenging conditions of the station's location in the coastal zone, the obtained results are physically sound and can be used to estimate greenhouse gas fluxes.

Keywords: carbon polygons, Gelendzhik, carbon dioxide flux, eddy covariance method, Li-Cor

Acknowledgements: The work was performed under state assignment topic no. FMWE-2023-0001 of Institute of Oceanology of RAS and funded by the Andrey Melnichenko Foundation.

For citation: Divinsky, B.V., Kuklev, S.B., Kremenetsky, V.V., Nedospasov, A.A., Ocherednik, V.V. and Kukleva, O.N., 2026. Experience in Monitoring Greenhouse Gas Emissions and Uptake in the Coastal Marine Zone. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 6–26.

Введение

В число парниковых газов, определяющих характер изменения климата на планете, входят водяной пар H₂O, диоксид углерода CO₂, метан CH₄, закись азота N₂O, а также группа газов, содержащих фтор. Водяной пар – наиболее распространенный парниковый газ в атмосфере. Его вклад в климатические колебания температуры воздуха ¹⁾, по разным оценкам, составляет 40–70%.

¹⁾ Atmospheric concentration of greenhouse gases: technical documentation. U.S. Environmental Protection Agency, 2016. 16 p. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/ghg-concentrations_documentation.pdf (date of access: 15.12.2025).

При этом считается, что хозяйственная деятельность человека (мелиорация, вырубка лесов) оказывает небольшое прямое влияние на концентрации H_2O . Согласно последнему бюллетеню Всемирной метеорологической организации ²⁾, наиболее важным парниковым газом с заметным антропогенным следом является диоксид углерода. За период с приблизительно 1750 (доиндустриальная эпоха) по 2023 г. вклад CO_2 в повышение температуры составил около 66%. Для сравнения: доля CH_4 – 16 %, N_2O – 6 %. Глобальная осредненная концентрация диоксида углерода в атмосфере в 2023 г. составила (420.0 ± 0.1) мкмоль/моль, при этом средняя скорость ее прироста за последнее десятилетие достигла 2.4 мкмоль/моль в год.

В Российской Федерации исследования потоков парниковых газов довольно интенсивно развиваются на протяжении последних лет [1–8]. В 2023 г. вышла монография [9], в которой обобщены балансовые оценки потоков основных парниковых газов на территории России и сделан вывод о том, что нетто-поглотителями парниковых газов являются так называемые лесные регионы страны (Сибирский, Дальневосточный и пр.), а источниками эмиссии – южные районы с преобладанием пастбищ и сельскохозяйственных земель (Южный, Северо-Кавказский, Приволжский).

В 2021 г. в рамках национальной системы контроля за динамикой парниковых газов Министерство науки и высшего образования Российской Федерации запустило проект «Карбоновые полигоны» (URL: <https://carbon-polygons.ru>), в рамках которого проводятся мониторинговые наблюдения на девятнадцати отдельных участках, расположенных в различных природных зонах России (степи, таежные леса, болота, пастбища, сельхозугодья, лесотундра). Основная задача карбоновых полигонов – проведение продолжительных и, что крайне важно, непрерывных измерений потоков парниковых газов с использованием современной приборной базы. Одним из таких полигонов является измерительная площадка в районе г. Геленджика Краснодарского края.

Несмотря на расширяющуюся сеть наблюдений, до сих пор отсутствуют детальные, основанные на прямых инструментальных измерениях данные о потоках парниковых газов для прибрежных курортных зон черноморского побережья. Особенности рельефа, почв, растительности и близость моря формируют уникальную прибрежную экосистему, углеродный баланс которой остается малоизученным.

Целью настоящей работы является исследование потоков диоксида углерода и водяного пара на карбоновом полигоне «Геленджик» с декабря 2024 г. по май 2025 г.

Материалы и методы

Карбоновый полигон «Геленджик». Полигон «Геленджик» общей площадью 26 га состоит из наземной и морской частей, на которых с 2022 г. проводятся регулярные инструментальные наблюдения за потоками углекислого газа, водяного пара и метана, а также сопутствующими параметрами состояния атмосферы [10–12].

²⁾ The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2023. Geneva : WMO, 2024. 11 p. (WMO Greenhouse Gas Bulletin ; No. 20). URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/69057> (date of access: 15.12.2025).

Согласно почвенно-экологическому районированию³⁾, район Геленджика расположен в пределах Новороссийского округа Западной буроземно-лесной почвенно-биоклиматической области суббореального географического пояса. Почвенный покров здесь представлен преимущественно кислыми оподзоленными буроземами и дерново-карбонатными почвами. Травяной ярус сформирован в основном овсяницей овечьей и коротконожкой перистой. Из растений встречаются иглица понтийская (*sp*), жасмин трехлисточковый (*sp*), ежевика анатолийская (*cop1*) и псоралея смолистая (*un*). Прибрежная растительность представлена также сосной пицундской со средней высотой крепления крон 8–9 м, дубом пушистым (курчавым), растущим единично или куртинами, средним возрастом около 12 лет, а также грабинником, шиповником, держидеревом, можжевельником.

В ноябре 2024 г. измерительная часть полигона была дополнена автоматической станцией мониторинга на базе газоанализатора *LI-7200* (*LI-COR Environmental*, США). Оператором установки является Южное отделение Института океанологии РАН. Станция смонтирована на открытом естественном грунте в 7 м от скального обрыва и в 25 м непосредственно от береговой линии (рис. 1). Координаты точки постановки: 44.576657° с. ш., 37.977450° в. д.

Основные компоненты станции (рис. 2):

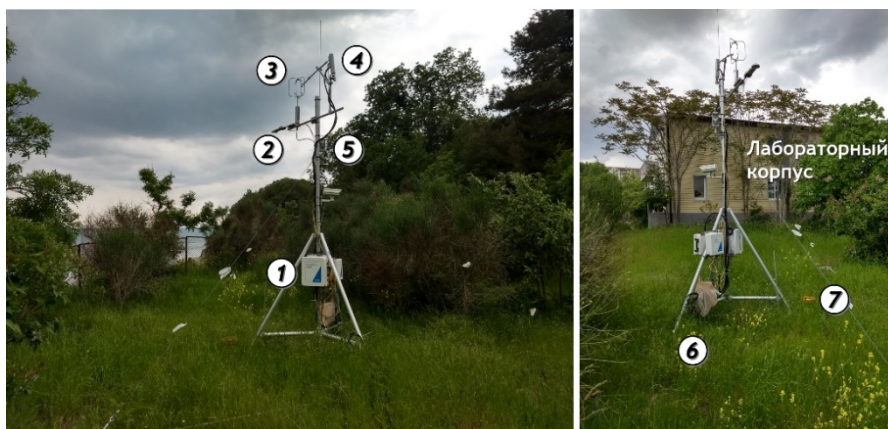
1. Интерфейсный модуль *LI-7550* (универсальный компонент всех газоизмерительных систем, содержит интегрированные средства для цифровой обработки сигналов от газоанализаторов).



Р и с . 1 . Положение станции мониторинга *LI-COR* на полигоне «Геленджик»

F i g . 1 . Location of the *LI-COR* monitoring station at the Gelendzhik polygon

³⁾ Информационная система «Почвенно-географическая база данных России»: [сайт]. URL: <https://soil-db.ru> (дата обращения: 15.12.2025).



Р и с . 2 . Измерительные приборы станции мониторинга LI-COR: 1 – интерфейсный модуль LI-7550; 2 – датчики потоков атмосферного тепла, включая датчик фотосинтетически активной радиации; 3 – ультразвуковой анемометр; 4 – газоанализатор; 5 – датчик температуры и влажности воздуха; 6 – почвенные датчики температуры, потоков тепла и влагосодержания; 7 – осадкомер

Fig. 2. Measuring instruments of the LI-COR monitoring station: 1 – LI-7550 interface module; 2 – atmospheric heat flux sensors, including a photosynthetically active radiation sensor; 3 – ultrasonic anemometer; 4 – gas analyser; 5 – air temperature and humidity sensor; 6 – soil temperature, heat flux and moisture content sensors; 7 – precipitation gauge

2. Датчики потоков атмосферного тепла, включая датчики фотосинтетически активной радиации (*Kipp&Zonen*, Нидерланды и *LI-190R*).

3. Ультразвуковой анемометр *uSonik-3* (*Metek*, Германия).

4. Газоанализатор *LI-7200*.

5. Датчик температуры и влажности воздуха *HMP155* (*Vaisala*, Финляндия).

6. Почвенные датчики температуры, потоков тепла и влагосодержания *HydraProbe* (*Stevens Water Monitoring Systems*, США) и *Hukseflux* (*Hukseflux*, Нидерланды).

7. Осадкомер *TR-525M* (*Texas Electronics*, США).

Газоанализатор *LI-7200* определяет молярные доли водяного пара и углекислого газа в пробе воздуха с точностью до 2 и 1 % от показаний соответственно. Электропитание станции осуществляется из лабораторного корпуса. Станция подключена к серверу для накопления и хранения данных измерений. Частота опроса датчиков измерительной аппаратуры – 10 Гц. Все данные обрабатываются штатным программным обеспечением и хранятся на сервере.

Получаемые со станции данные формируют три отдельных массива:

1. Получасовые массивы данных с шагом дискретизации 0.1 с (всего 18 000 значений), содержащие значения содержания в воздухе углекислого газа CO_2 и водяного пара H_2O , атмосферного давления, температуры воздуха, трех компонент скорости ветра.

2. Обработанные массивы данных с дискретностью 1 мин, включающие следующие характеристики: альbedo поверхности; коротко- и длинноволновую входящую и исходящую радиацию; плотность фотосинтетического потока

радиации (*Photosynthetic Photon Flux Density, PPF*); количество осадков; температуру и относительную влажность воздуха; влагосодержание и температуру почвы; поток тепла в почве (*Soil Heat Flux, SHF*).

3. Статистические параметры, характеризующие состояние атмосферы и почвы и полученные обработкой 30-минутных исходных данных. Параметры включают: средние значения, дисперсию и высшие моменты (асимметрию, эксцесс) распределений трех компонент скорости ветра (двух горизонтальных и вертикальной), концентрации углекислого газа и водяного пара, температуры почвы; средние значения альbedo поверхности, коротко- и длинноволновой входящей и исходящей радиации, *PPFD*, осадков, влажности и температуры воздуха, влагосодержания и температуры почвы, *SHF*; средние значения потоков явного и скрытого тепла, потоков углекислого газа и водяного пара; средние параметры состояния атмосферы (температура, влажность, давление, скорость и направление ветра, оценка турбулентной кинетической энергии, отношение Боуэна); оценки ковариации между потоками парниковых газов и основными метеорологическими параметрами.

Программное обеспечение (*EddyPro*) позволяет корректировать оценки потоков на основании анализа выбросов, устойчивости воздушного потока, трендовых составляющих и временных задержек измерительной аппаратуры.

Расчеты потоков парниковых газов

Метод турбулентных пульсаций. В настоящее время наиболее распространенным и теоретически обоснованным способом расчета потоков парниковых газов является метод турбулентных пульсаций (*eddy covariance method*). Основные принципы метода изложены в руководствах^{4), 5)} и заключаются в следующем. Турбулентный вертикальный поток любого вещества (например, парникового газа) может быть представлен как ковариация вертикальной скорости ветра и концентрации этого вещества. Высокая частота турбулентных пульсаций, характерная для атмосферы, накладывает повышенные требования к регистрирующей аппаратуре и рабочей частоте датчиков (10 Гц в нашем случае). Важными ограничениями метода являются следующие допущения: 1) флуктуации плотности воздуха малы и ими можно пренебречь; 2) за период измерений (30 мин) вертикальные движения массы воздуха незначительны. В реальных природных условиях, особенно на участках со сложным рельефом, указанные условия не всегда выполнимы, что влечет за собой естественные погрешности и неопределенности измерений.

Зона охвата. Важным параметром метода турбулентных пульсаций является так называемая зона охвата (*footprint*) – пространственная область, потоки с которой регистрируют приборы станции. Оценка зоны охвата зависит от множества факторов: высоты установки приборов (4 м в нашем случае), шероховатости поверхности, а также характера стратификации атмосферы. Горизонтальная протяженность зоны охвата, определяемая как расстояние в наветренную

⁴⁾ Eddy covariance. A practical guide to measurement and data analysis / edited by M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale. Springer Science+Business Media B.V., 2012. 438 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>

⁵⁾ Бурба Г. Г., Курбатова Ю. А., Куричева О. А., Авилов В. К. и др. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. Москва : ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 223 с.

сторону от точки установки датчиков, описывается статистически в терминах квантилей распределения. Например, 80%-ная зона охвата – это протяженность (в метрах) участка, с которого вклад данного вещества (CO_2 в нашем случае) в поток составил 80 %.

Разделение потоков. Рассчитанный методом турбулентных пульсаций поток углекислого газа представляет собой чистый экосистемный обмен (*Net Ecosystem Exchange, NEE*) и может быть разделен на две крупнейшие составляющие углеродного цикла: валовую первичную продукцию *GPP* (*Gross primary production*) и дыхание почвы (экосистемное дыхание) R_{eco} . Валовая первичная продукция – это общее количество органического вещества, созданного автотрофными организмами в процессе фотосинтеза (точнее, хемосинтеза). *GPP* отражает, таким образом, количество углерода, поглощенного растениями при фотосинтезе. Экосистемное дыхание связано с процессами преобразования органического углерода в CO_2 организмами и выступает в качестве основного пути выброса углерода из наземных экосистем в атмосферу. В общем виде $NEE = R_{\text{eco}} - GPP$.

Разделение потоков выполнено в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [13]. В настоящее время существует несколько методов разделения. Наиболее широко используются два альтернативных подхода – так называемое ночное (*nighttime*) и дневное (*daytime*) разделения:

1. При ночном разделении [14] оценивают R_{eco} в ночное время, оценка в дальнейшем экстраполируется на светлое время суток. *GPP* рассчитывается как разность R_{eco} и *NEE*. В этом случае стохастическая природа турбулентности и шумы в сигналах измерений могут приводить к отрицательным оценкам потоков *GPP*, хотя они положительны по определению. Тем не менее отрицательные потоки *GPP* не следует удалять (или обнулять), поскольку это приведет к существенному смещению общих оценок валовой первичной продукции.

2. Дневное разделение [15] основано на модельных оценках NEE_{mod} с использованием светочувствительных кривых в предположении о пропорциональности потоков углекислого газа и поступающей радиации. С учетом неопределенности и ошибки модельных аппроксимаций потоков результирующий модельный поток, рассчитанный как разность ($R_{\text{eco}} - GPP$), может в точности не соответствовать измеренному значению *NEE*.

Отметим важную деталь. Поскольку природная система сложная и многофакторная, данные о потоках первичной продукции и экосистемного дыхания, полученные за конкретный срок, скорее всего, будут содержать значительную погрешность. Однако обработанные статистически за продолжительный срок (месяцы, годы) эти данные будут вполне корректно отражать балансовые составляющие углеродного цикла рассматриваемой экосистемы.

Качество данных. Ключевым моментом метода турбулентных пульсаций является предположение о стационарности (пространственной однородности) среднего потока. Качество исходных данных определяется подходом, изложенным в работе [16]. Исходная 30-минутная серия наблюдений разбивается на шесть 5-минутных сегментов. Для каждого сегмента рассчитывается ковариация между пульсациями вертикальной скорости и исследуемым параметром.

Поток полагается стационарным, если ковариации для сегментов данных отличаются от ковариации, построенной для всего ряда, не более чем на 30 %. В целом для каждой серии устанавливается флаг, определяющий корректность измерений:

- флаг 0 (отклонения < 30 %) – данные высокого качества;
- флаг 1 (отклонения < 100 %) – данные среднего качества, но пригодные для использования в программах долгопериодных исследований;
- флаг 2 (отклонения > 100 %) – данные низкого качества, подлежащие исключению из анализа.

Доля серий с данными низкого качества (флаг 2) о потоках углекислого газа распределяется по месяцам следующим образом: декабрь – 22 %, январь – 15 %, февраль – 26 %, март – 21 %, апрель – 19 %, май – 22 %. Таким образом, в среднем за месяц около 20 % данных признаются непригодными по качеству, что создает пропуски в общих рядах. Непрерывность временных рядов достигается искусственным заполнением пропусков с использованием алгоритмов, описанных в работе [13].

Результаты и обсуждение

Основными параметрами, используемыми для оценки интегральных величин эмиссии (поглощения) парниковых газов, являются: поток углекислого газа, потоки явного и скрытого тепла, входящий поток коротковолновой радиации, температура воздуха и почвы, относительная влажность, дефицит давления водяного пара, характеристики ветрового потока (скорость, направление ветра, скорость трения, длина Монины – Обухова для турбулентного потока).

На рис. 3–5 представлена временная динамика некоторых параметров атмосферы, а также содержания углекислого газа и водяного пара, измеренного за полугодовой период эксперимента.

Как следует из рис. 3, с конца января наблюдается устойчивый рост плотности фотосинтетического потока, необходимого для фотосинтеза. С наступлением календарной весны (март) почва постепенно прогревается, при этом знак *SHF* сменяется на положительный. Отрицательные среднесуточные температуры воздуха регистрировались лишь во второй половине февраля. На рис. 3 представлена сезонная динамика ключевых абиотических факторов, определяющих углеродный обмен экосистемы. Анализ среднесуточных значений показывает, что с конца января наблюдается устойчивый рост *PPFD*, что создает предпосылки для начала активной вегетации. Прогрев почвы, о котором свидетельствует смена знака *SHF* на положительный, становится устойчивым с марта, совпадая с наступлением календарной весны. При этом периоды с отрицательными среднесуточными значениями температуры воздуха T_a отмечались только во второй половине февраля. Динамика температуры почвы T_s соответствовала изменениям температуры воздуха и радиационного баланса. Комплексный набор данных служит основой для последующего анализа движущих сил и сезонной динамики потоков парниковых газов.

Распределение атмосферных осадков по месяцам в период наблюдений неравномерно (рис. 4).

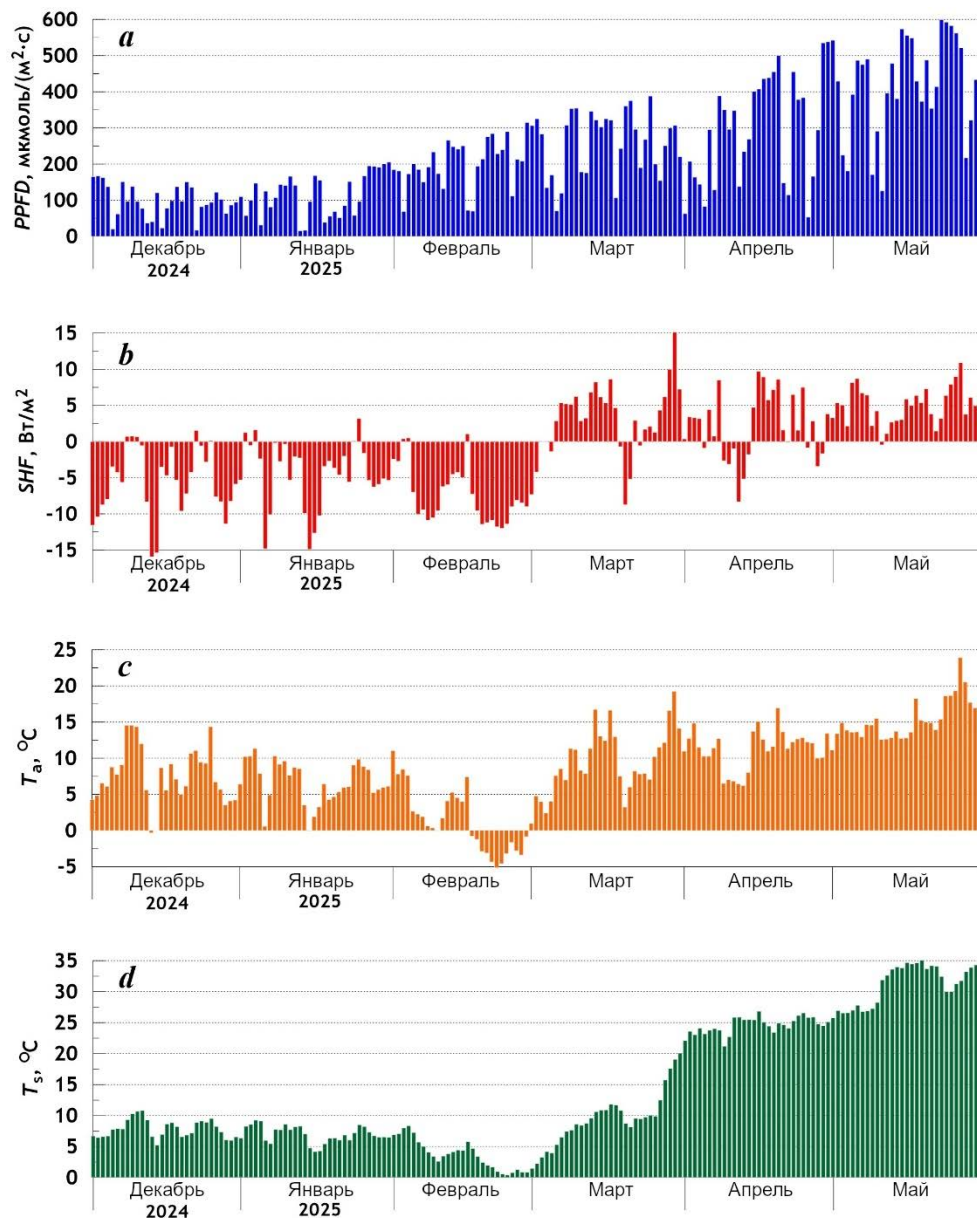
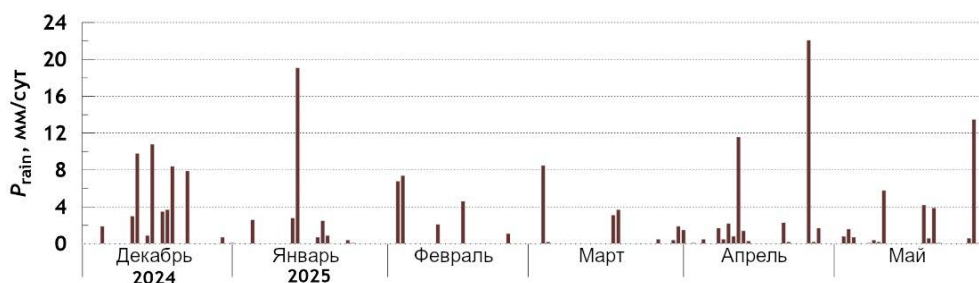


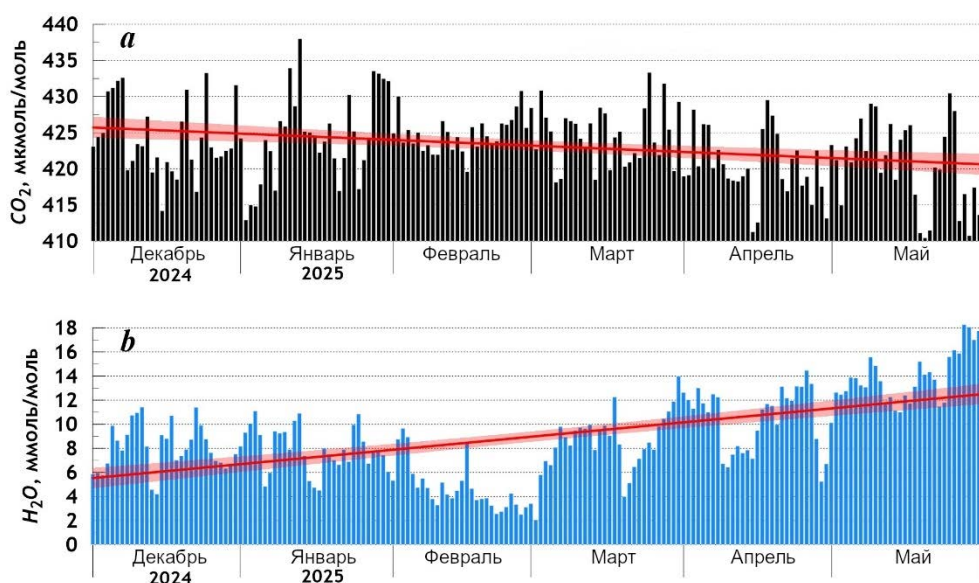
Рис. 3. Среднесуточные значения плотности фотосинтетического потока $PPFD$, потока тепла из почвы SHF , температуры воздуха T_a и почвы T_s с декабря 2024 г. по май 2025 г.

Fig. 3. Daily average values of photosynthetic photon flux density $PPFD$, soil heat flux SHF , air temperature T_a and soil temperature T_s from December 2024 to May 2025



Р и с . 4 . Суточные значения атмосферных осадков за период с декабря 2024 г. по май 2025 г.

Fig . 4 . Daily atmospheric precipitation values from December 2024 to May 2025



Р и с . 5 . Среднесуточные концентрации углекислого газа и водяного пара в атмосфере с декабря 2024 г. по май 2025 г. Красная прямая представляет линейную аппроксимацию, розовая область – 95%-ный доверительный интервал для линии регрессии

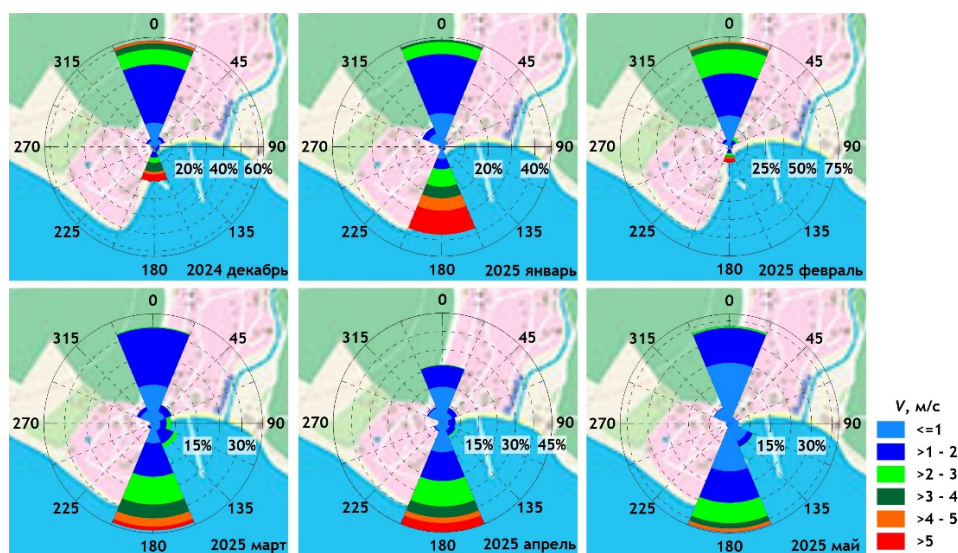
Fig . 5 . Daily average concentrations of carbon dioxide and water vapour in the atmosphere from December 2024 to May 2025. The red line represents linear approximation, the pink area shows the 95% confidence interval for the regression line

Суммарные месячные значения осадков составили (в скобках – климатическая норма осадков по данным Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане ⁶⁾): декабрь – 50.7 мм (60.1 мм); январь – 29.1 мм (40.4 мм); февраль – 22.0 мм (31.8 мм); март – 19.8 мм (32.3 мм); апрель – 45.6 мм (30.7 мм); май – 32.7 мм (31.6 мм). Самым влажным месяцем является декабрь, хотя количество осадков было несколько ниже климатических значений. Январь, февраль и март выдались аномально засушливыми, в апреле количество осадков в полтора раза превысило норму, май характеризовался средними значениями.

Максимальное содержание углекислого газа (рис. 5) наблюдалось в феврале (437.8 мкмоль/моль), минимальное – в мае (410.5 мкмоль/моль).

Наибольшие значения концентрации водяного пара зафиксированы в мае (18.1 ммоль/моль), наименьшие – в марте (1.9 ммоль/моль). Средняя за период наблюдений концентрация CO₂ в воздухе составила (423.2 ± 5.2) мкмоль/моль (при среднемировой в 420 мкмоль/моль), H₂O – (9.0 ± 3.6) ммоль/моль. С декабря по май наблюдается устойчивый отрицательный тренд среднесуточных концентраций углекислого газа и положительный – водяного пара. Такая сезонная динамика характерна для всех территорий с сезонными изменениями ключевых параметров атмосферы и растительного покрова, определяющими температуру воздуха и активность фотосинтеза.

На рис. 6 представлены месячные розы ветров, характеризующие повторяемость средних скоростей ветра по 45-градусным секторам направлений.



Р и с . 6 . Повторяемость (%) скоростей ветра V по направлениям в районе проведения эксперимента

F i g . 6 . Wind speed frequency V (%) by directions in the experiment area

⁶⁾ Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). URL: www.esimo.ru (дата обращения: 10.12.2025).

Как следует из рис. 6, ветровой режим характеризуется двумя выраженными секторами направлений: северным и южным. В декабре и феврале доминировали ветры северных румбов (60%- и 73%-ной повторяемости соответственно), в апреле – южных (45%-ной повторяемости). В январе незначительно преобладали потоки северных направлений, в марте и мае – южных. Среднемесячные и максимальные скорости ветра в декабре составили соответственно 1.8 и 20.0 м/с, январе – 2.1 и 17.1 м/с, феврале – 1.7 и 18.9 м/с, марте – 1.5 и 15.7 м/с, апреле – 1.5 и 18.5 м/с, мае – 1.0 и 12.7 м/с. Несмотря на то что в климатическом плане наиболее сильными в регионе являются северные ветры (новороссийская борá), за рассматриваемый период максимальными скоростями отличались ветры южных направлений.

Рассчитанные зоны охвата карбонового следа (рис. 7) в целом отражают рассмотренные выше особенности ветровых условий. Зона охвата вытянута

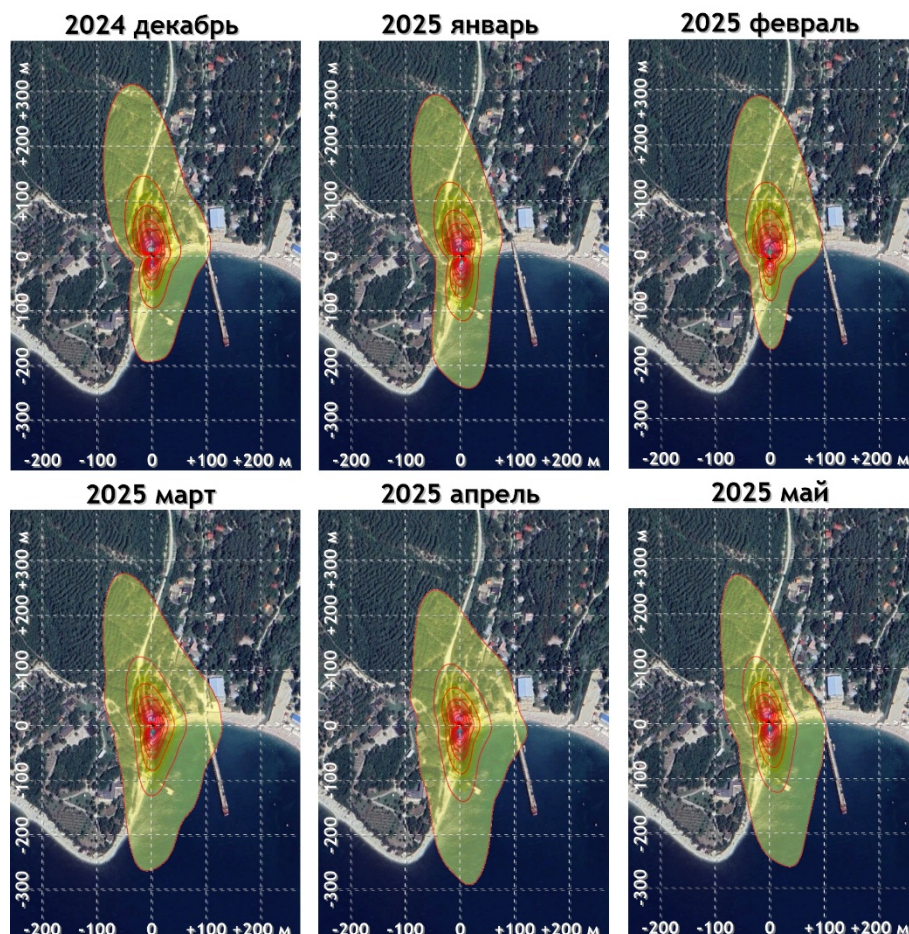


Рис. 7. Зоны охвата карбонового следа по месяцам наблюдений. Изолинии проведены для 10, 20, ..., 90-х перцентилей распределений

Fig. 7. Carbon footprint coverage areas by observation months. The isolines are drawn for 10, 20, ..., 90th percentiles of the distributions

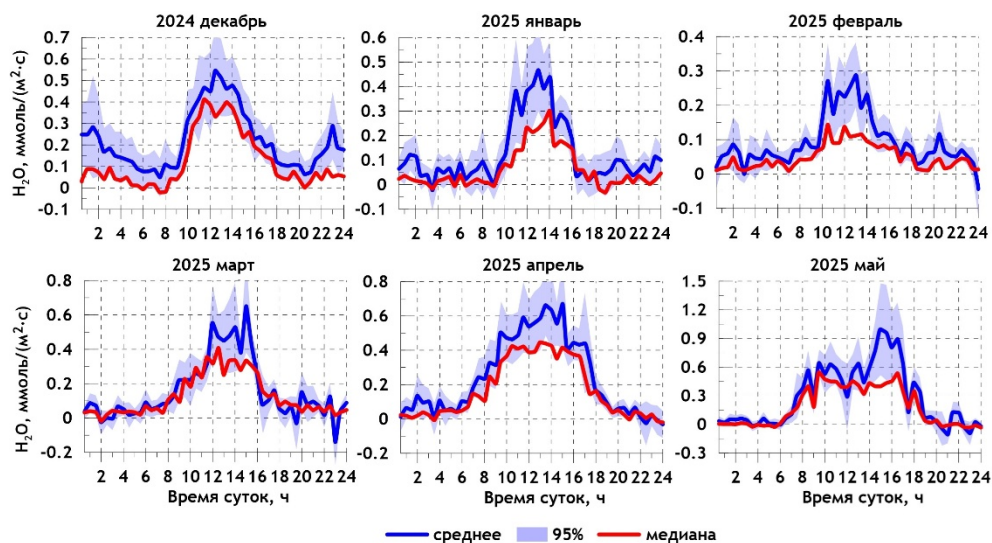
в меридиональном направлении (север – юг). Среднее расстояние, формирующее основной вклад в измеряемый поток, составляло 60 м от измерительной станции, в то время как расстояние, охватывающее 90 % вклада (90-й процентиль), достигало 175 м. Среднемесячная зона охвата составляет, таким образом, около 11 тыс. м² подстилающей поверхности. В декабре и феврале зона охвата существенно выдвинута к северу. В марте и мае зона охвата расширяется к юго-востоку, следуя увеличивающейся повторяемости ветров юго-восточного направления.

На рис. 8 и 9 представлена внутрисуточная динамика потоков водяного пара и колебания чистого обмена экосистемы *NEE* соответственно, осредненные по месяцам. На графиках приведены средние значения, 95%-ные доверительные интервалы для среднего, а также медианы распределений. Различия между средними и медианными значениями указывают на отклонения распределений потоков от нормальных. Особенно сильно расхождения выражены в зимние месяцы, что связано, возможно, со сложностями интерпретации результатов измерений в этот период. Тем не менее характер поведения кривых средних и медиан в целом совпадает.

Поток водяного пара достигает дневного пика с 10:00 до 16:00 зимой, с наступлением весны пиковый период расширяется. Примечателен второй максимум потоков водяного пара, приходящийся на ночное время (23:00–01:00), прослеживающийся в декабре и (уже слабее) в январе.

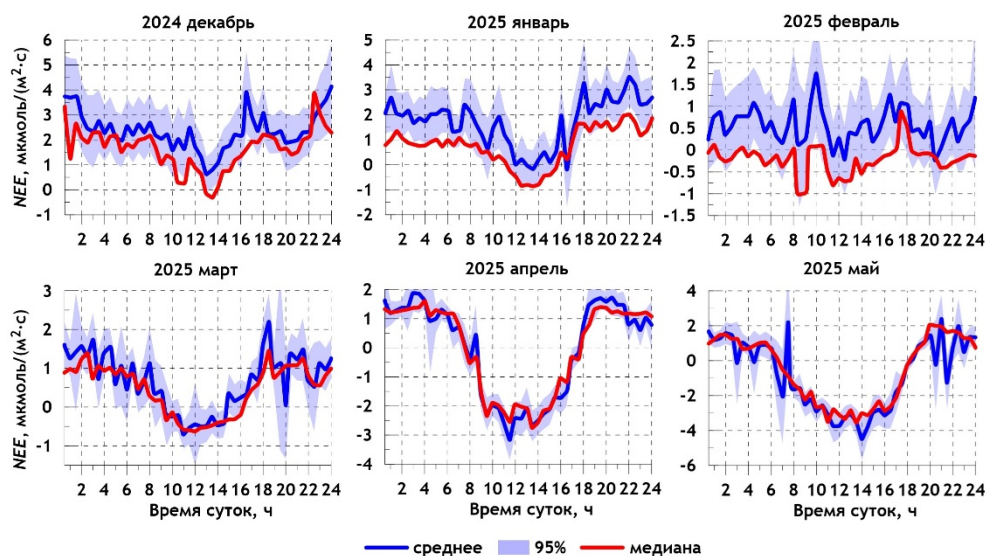
Зимние месяцы характеризуются преобладающей эмиссией углекислого газа в атмосферу (рис. 9) с относительно слабо выраженным суточным ходом.

Начиная с марта устанавливается устойчивый суточный ход колебаний потоков CO₂: в дневное время углекислый газ активно поглощается, в ночное – выделяется. В мае временной диапазон поглощения углекислого газа составляет около 12 ч (с 6:00 до 18:00). Наибольший объем выбросов CO₂ наблюдался



Р и с . 8 . Внутрисуточные потоки водяного пара

F i g . 8 . Diurnal water vapour fluxes



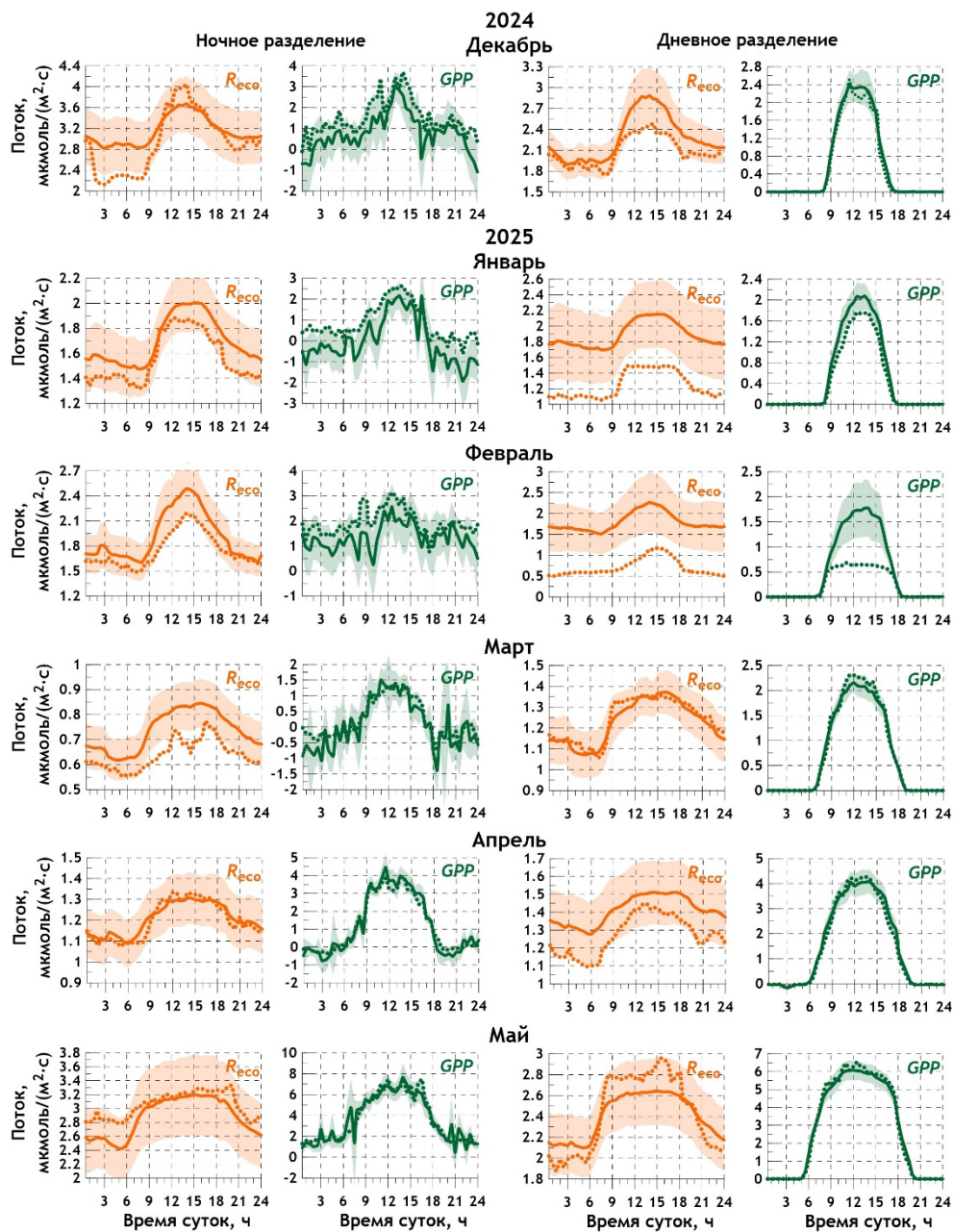
Р и с . 9 . Внутрисуточные потоки углекислого газа

F i g . 9 . Diurnal carbon dioxide fluxes

в декабре, поглощений – в мае с характерными значениями потоков в 4–5 и 3–4 мкмоль/(м²·с) соответственно. Внутрисуточные колебания потоков водяного пара и углекислого газа отмечают почти все исследователи (например, в работах [17–19]). Эти колебания обусловлены температурой воздуха, а также фотосинтетической активностью. Естественно, параметры этих колебаний (амплитуда, время наступления пиков) зависят от множества других факторов, связанных с влажностью почвы, состоянием подстилающей поверхности, атмосферными условиями.

Как было уже сказано, поток углекислого газа NEE может быть разделен на две важные составляющие углеродного цикла, а именно валовую первичную продукцию GPP и экосистемное дыхание R_{eco} , графики суточных колебаний которых представлены на рис. 10. Оценки GPP и R_{eco} рассчитаны по двум альтернативным методикам, связанным с дневным и ночным разделением потоков углекислого газа.

Итак, валовая первичная продукция GPP количественно определяет фотосинтетическое поглощение углерода экосистемой. Положительные экстремумы GPP соответствуют максимальному поглощению экосистемой углекислого газа. В контексте экосистем отрицательное дыхание R_{eco} относится к поглощению углекислого газа, тогда как положительное дыхание относится к его выбросу. Напомним: при ночной схеме разделения моделируется экосистемное дыхание R_{eco} , а валовая продукция GPP рассчитывается как разность R_{eco} и NEE . При дневном разделении моделируется как GPP , так и R_{eco} . При этом итоговый модельный обмен экосистемы, рассчитываемый как $NEE_{mod} = R_{eco}(\text{день}) - GPP(\text{день})$, с учетом неизбежной ошибки моделирования будет отличаться от экспериментально измеренного NEE .

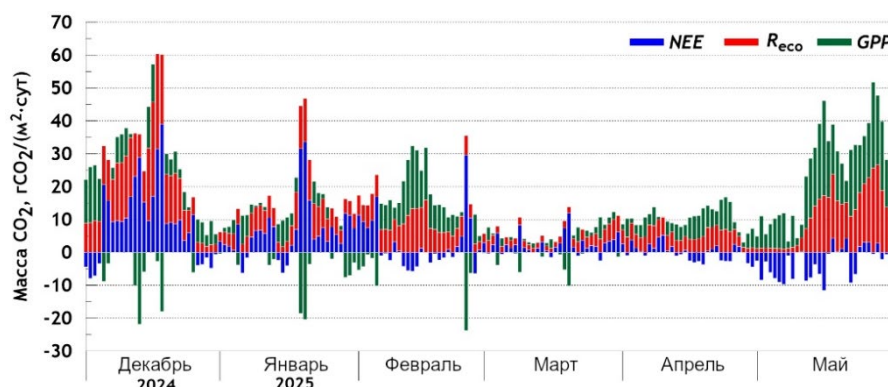


Р и с . 10 . Внутрисуточные потоки валовой первичной продукции GPP и экосистемного дыхания R_{eco} (среднее значение – сплошная линия, медиана – пунктирная, окрашенная область – 95%-ный доверительный интервал)

Fig. 10. Diurnal fluxes of gross primary production GPP and ecosystem respiration R_{eco} (the solid line is average, the dotted line is median, the shaded area is 95% confidence interval)

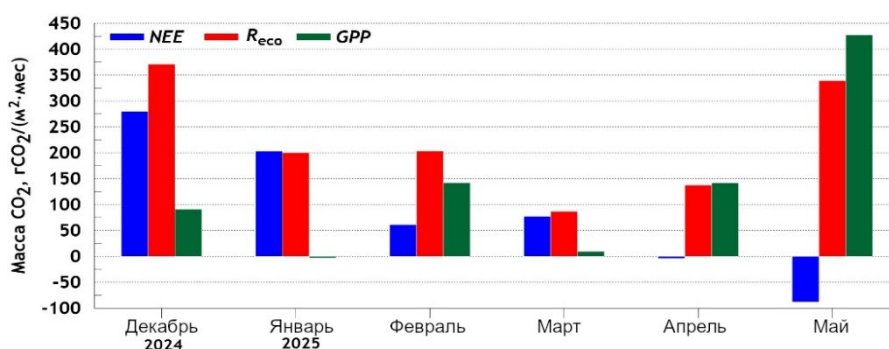
На рис. 10 весьма примечательным является второй пик экосистемного дыхания, приходящийся на ночное время. Обращает на себя внимание ступенчатая форма кривой GPP при дневной схеме разделения, обусловленная особенностями алгоритмической аппроксимации на основе световых кривых. Тем не менее с наступлением календарной весны и усилением фотосинтеза «дневные» и «ночные» кривые GPP демонстрируют удовлетворительное согласие, особенно в апреле и мае.

На рис. 11 и 12 приведены соответственно суммарные суточные и суммарные месячные массы углекислого газа, выброшенные в атмосферу или поглощенные в атмосфере. Расчеты выполнены по ночной схеме разделения потоков.



Р и с . 11 . Суточные массы углекислого газа, соответствующие чистому обмену экосистемы NEE , экосистемному дыханию R_{eco} и валовой первичной продукции GPP

Fig . 11 . Daily masses of carbon dioxide corresponding to net ecosystem exchange NEE , ecosystem respiration R_{eco} and gross primary production GPP



Р и с . 12 . Суммарные месячные массы углекислого газа, соответствующие чистому обмену экосистемы NEE , экосистемному дыханию R_{eco} и валовой первичной продукции GPP

Fig . 12 . Total monthly masses of carbon dioxide corresponding to net ecosystem exchange NEE , ecosystem respiration R_{eco} and gross primary production GPP

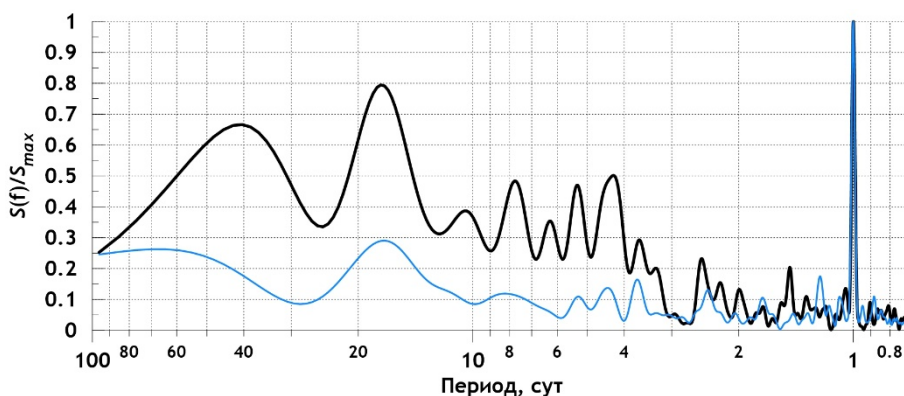
Таким образом, с декабря по март наблюдалась эмиссия CO_2 в атмосферу. Чистый экосистемный обмен NEE в декабре составил $278 \text{ гCO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$, в марте – $76 \text{ гCO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$. С апреля наблюдается тенденция к поглощению атмосферного углекислого газа, которое достигло в мае $88 \text{ гCO}_2/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$.

Суммарно за полгода измерений чистый объем выброса углекислого газа NEE составил $529 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$. При этом на экосистемное дыхание пришлось $R_{\text{eco}}(\text{ночь}) = 1338 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, на валовую продукцию – $GPP(\text{ночь}) = 809 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$.

Оценки, полученные по дневной схеме разделения потоков, демонстрируют сопоставимые результаты: $R_{\text{eco}}(\text{день}) = 1271 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, $GPP(\text{день}) = 768 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$. Полученные значения дают модельную оценку $NEE(\text{день}) = 503 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$.

Таким образом, экспериментальное значение суммарных выбросов (NEE) за полгода составило $529 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$, модельное – $503 \text{ гCO}_2/\text{м}^2$. Близкие значения позволяют говорить о корректности проведенных измерений и расчетов.

В качестве небольшого дополнения исследуем колебания потоков углекислого газа и водяного пара в частотной области. На рис. 13 представлены частотные спектры этих колебаний.



Р и с . 13 . Нормализованные спектры колебаний потоков углекислого газа (черная кривая) и водяного пара (синяя кривая)

Fig . 13 . Normalized spectra of carbon dioxide (black curve) and water vapour (blue curve) flux fluctuations

Для удобства сравнения спектры нормализованы на значения спектральных плотностей, соответствующих частотам максимумов. Отметим также, что спектры построены по сглаженным исходным данным, что устраняет пульсационные составляющие. Как следует из рис. 13, в спектрах колебаний потоков парниковых газов преобладают два периода: суточный (24 ч) и период 17.2 сут. Для спектра CO_2 эти периоды сопоставимы по амплитуде, тогда как в спектре колебаний H_2O суточный цикл является абсолютно доминирующим. Колебания потоков углекислого газа на масштабах синоптической (несколько суток), а также сезонной изменчивости (около 40 сут) представляют самостоятельный интерес, но требуют более детального исследования и составят предмет отдельной задачи.

Заключение

В свете принятия в 2025 г. в России нового национального проекта «Экологическое благополучие» исследования потоков парниковых газов являются важной не только экологической, но и экономической, социальной и политической задачей. Вместе с тем прямые инструментальные измерения потоков далеко не тривиальны. Метод турбулентных пульсаций, используемый в настоящей работе, накладывает несколько существенных ограничений на условия проведения эксперимента. Укажем лишь на самые важные: 1) рассматриваемый участок должен быть пространственно однородным, не осложненным природными или искусственными препятствиями; 2) тепловой баланс (включающий потоки явного и скрытого тепла, а также почвенные потоки) должен замыкаться. Буквальное соблюдение этих условий практически невыполнимо, особенно в местах активной хозяйственной деятельности. Обширные степные (или тундровые) участки могут соответствовать первому условию, но даже для них тепловой баланс будет, скорее всего, незамкнут вследствие неучтенных адвективных потоков тепла, внутренних источников или вертикальных токов, связанных с неравномерным нагревом поверхности.

Несмотря на безусловную проблемную сторону вопроса, заметим, что станция мониторинга парниковых газов в г. Геленджике расположена на типичном участке курортной зоны черноморского побережья Краснодарского края. Измерения на подобных участках представляются необходимыми как с научной, так и с практической точки зрения. Карбоновый полигон «Геленджик» является, по сути, первым опытом измерений в подобных условиях. Кроме того, результаты эксперимента базируются не на одиночных (случайных) измерениях, а на продолжительных непрерывных данных, что придает им известную статистическую достоверность. Добавим, что в настоящее время метод турбулентных пульсаций успешно применяется для условий не только природной среды, но и городских поселений. К примеру, в работе [20] используются данные измерений парниковых газов, полученные с двух станций, расположенных непосредственно в городской черте г. Базеля (Швейцария).

Укажем на основные полученные результаты:

1. Измерительная станция полигона «Геленджик», функционирующая с декабря 2024 г., в автоматическом режиме регистрирует потоки основных парниковых газов, а также параметры состояния атмосферы. Станция является частью российского проекта мониторинга парниковых газов.

2. По результатам эксперимента установлено, что с декабря 2024 г. по май 2025 г. на исследуемом участке с квадратного метра в атмосферу поступило около 500 г углекислого газа. При этом на экосистемное дыхание пришлось около 1300 г, на валовую продукцию – 800 г.

3. Выявлена сезонная динамика углеродного обмена: в зимние месяцы, а также в начале календарной весны преобладает эмиссия CO_2 в атмосферу, с апреля наблюдается его усвоение экосистемой.

Подводя итог, отметим, что, несмотря на определенную дискуссионность местоположения станции, полученные результаты могут быть интерпретированы с физической точки зрения. В частности, суточный и сезонный ход содержания водяного пара и углекислого газа хорошо согласуются с общепринятыми представлениями. Это подтверждает корректность полученных данных

и перспективность инструментальных измерений потоков парниковых газов в сложных условиях при дальнейшем усовершенствовании методов обработки данных.

Продолжение эксперимента и – самое главное – получение непрерывных данных позволит в дальнейшем провести анализ потоков парниковых газов и сопутствующих метеоэлементов в широком диапазоне временной изменчивости, включая сезонные и межгодовые колебания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замолодчиков Д. Г., Гитарский М. Л., Шилкин А. В., Марунич А. С. и др.* Мониторинг газообмена H₂O и CO₂ на полигоне «Лог Тасжный» (Валдайский национальный парк) // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 1. С. 54–68. EDN YUIYXZ. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-1-54-68>
2. *Хоружий Д. С.* Изменчивость потока CO₂ на границе раздела вода – атмосфера в прибрежных водах Черного моря на разных масштабах времени в 2010–2014 гг. // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 5. С. 434–445. EDN YMQLZJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-5-434-445>
3. *Кривенко Л. А., Суворов Г. Г., Авилов В. К., Сиринов А. А.* Измерение потоков CO₂, CH₄, H₂O методом турбулентных пульсаций: использование мобильной установки и учет изменяющейся зоны охвата // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 11. С. 942–950. EDN TFWHLP. <https://doi.org/10.15372/AOO20191111>
4. *Федоров Ю. А., Сухоруков В. В., Трубник Р. Г.* Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2021. Т. 7, № 1. С. 6–34. EDN WKLFBN. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
5. *Сатосина Е. М., Зырянов В. И., Прокушкин А. С., Ольчев А. В.* Временная изменчивость потоков диоксида углерода, метана, явного и скрытого тепла в лесных и болотных экосистемах северной Евразии // *Грозненский естественнонаучный бюллетень*. 2022. Т. 7, № 4. С. 79–85. EDN TCGSHS. <https://doi.org/10.25744/genb.2022.41.14.010>
6. *Mamkin V., Avilov V., Ivanov D., Varlagin A. et al.* Interannual variability in the ecosystem CO₂ fluxes at a paludified spruce forest and ombrotrophic bog in the Southern Taiga // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 23, iss. 3. P. 2273–2291. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2273-2023>
7. *Орехова Н. А., Медведев Е. В., Мукосеев И. Н., Гармашов А. В.* Поток CO₂ на границе с атмосферой в северо-восточной части Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2024. № 1. С. 57–67. EDN GNFAZA.
8. *Панов А. В., Махныкина А. В., Урбан А. В., Зырянов В. И. и др.* Потоки углерода в экосистемах средней тайги центральной Сибири // *Сибирский лесной журнал*. 2024. № 3. С. 37–53. EDN QWMBOD. <https://doi.org/10.15372/SJFS20240305>
9. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации / под ред. А. А. Романовской. Москва : ИГКЭ, ООО «Принт», 2023. 346 с.
10. *Куклев С. Б., Кременецкий В. В., Крыленко В. В., Руднев В. И.* Цифровая модель «Карбонового полигона в Краснодарском крае» на базе ЮО ИО РАН (г. Геленджик) // *Экология гидросферы*. 2022. № 1. С. 18–28. EDN EYZMJT. [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-1\(7\)-18-28](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-1(7)-18-28)
11. *Варварова А. О., Полухин А. А., Бердникова Е. К., Мухаметов С. С. и др.* Пространственно-временная изменчивость параметров карбонатной системы вод на карбо-

новом полигоне «Геленджик» в летний период // Морские исследования и образование (MARESEDU-2023) (Москва, 23–27 октября 2023 года) : труды XII Международной научно-практической конференции. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2024. Т. II (IV). С. 503–507. EDN PJFRTQ.

12. Руднев В. И., Пушкин В. В., Куклев С. Б. Методика измерения концентрации парниковых газов на тестовом полигоне вблизи Голубой бухты (северо-восток Черного моря) // Экология гидросферы. 2024. № 2. С. 91–100. EDN ZPGMPC. [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2024-2\(12\)-91-100](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2024-2(12)-91-100)
13. Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc // Biogeosciences. 2018. Vol. 15, iss. 16. P. 5015–5030. <https://doi.org/10.5194/bg-15-5015-2018>
14. Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm // Global Change Biology. 2005. Vol. 11, iss. 9. P. 1424–1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
15. Lasslop G., Reichstein M., Papale D., Richardson A. D. et al. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation // Global Change Biology. 2010. Vol. 16, iss. 1. P. 187–208. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x>
16. Foken T., Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements // Agricultural and Forest Meteorology. 1996. Vol. 78, iss. 1–2. P. 83–105. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02248-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02248-1)
17. Тимохина А. В., Прокушкин А. С., Панов А. В. Суточная и сезонная динамика концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере над экосистемами Западной Сибири (Приенисейская часть) // Вестник КрасГАУ. 2014. № 12. С. 83–88. EDN THAMND.
18. Rastogi B., Berkelhammer M., Wharton S., Whelan M. E. et al. Ecosystem fluxes of carbonyl sulfide in an old-growth forest: temporal dynamics and responses to diffuse radiation and heat waves // Biogeosciences. 2018. Vol. 15, iss. 23. P. 7127–7139. <https://doi.org/10.5194/bg-15-7127-2018>
19. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии / под ред. С. К. Гулева и А. В. Ольчева. Москва : Научный мир, 2025. 419 с.
20. Stagakis S., Feigenwinter C., Vogt R., Brunner D. et al. A high-resolution monitoring approach of urban CO₂ fluxes. Part 2 – surface flux optimisation using eddy covariance observations // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 903. 166035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166035>

Поступила 16.09.2025 г.; одобрена после рецензирования 11.11.2025 г.; принята к публикации 18.12.2025 г.; опубликована 31.03.2026 г.

Об авторах:

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, **SPIN-код: 2027-8359**, divin@ocean.ru

Куклев Сергей Борисович, заведующий лабораторией гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **ORCID: 0000-0003-4494-9878**, **ResearcherID: G-5656-2017**, **SPIN-код: 7717-9703**, kuklev@ocean.ru

Кременецкий Вячеслав Вячеславович, заместитель директора по физическому направлению, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7775-9224**, *sk@ocean.ru*

Недоспасов Андрей Андреевич, младший научный сотрудник, лаборатория экспериментальной физики океана, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), **SPIN-код: 4072-2800**, *nedospasov.aa@ocean.ru*

Очередник Владимир Владимирович, научный сотрудник, лаборатория гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 36), **ORCID: 0000-0002-3593-7114**, **ResearcherID: G-2850-2017**, **SPIN-код: 6522-7608**, *poekperementarium@gmail.com*

Куклева Ольга Николаевна, научный сотрудник, лаборатория гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36), **ResearcherID: J-7126-2018**, **AuthorID: 168591**, *kukleva-ola@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Дивинский Борис Васильевич – постановка задачи, анализ результатов, оформление статьи

Куклев Сергей Борисович – постановка задачи, анализ литературы

Кременецкий Вячеслав Вячеславович – обеспечение эксперимента

Недоспасов Андрей Андреевич – обеспечение эксперимента

Очередник Владимир Владимирович – обеспечение эксперимента

Куклева Ольга Николаевна – подготовка исходных данных, оформление статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.