



УДК 504.3.054
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-3-462-476
EDN ЛЮРСА

Результаты мониторинга концентрации и потоков углекислого газа в г. Белгороде (2023–2024 гг.)

Голеусов П.В.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
goleusov@bsuedu.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности и результаты ведения мониторинга потоков углекислого газа в городских условиях с использованием метода турбулентных пульсаций на площадке карбонового полигона НИУ «БелГУ». Схема мониторинга включает измерения на двух уровнях эколого-климатических станций (ЭКС), установленных на башне на высотах 10 (ЭКС_10) и 49 (ЭКС_49) м. ЭКС_10 охватывает измерения преимущественно экспериментальную площадку полигона, а ЭКС_49 – участок Юго-Западного района г. Белгорода, на контакте различных типов городских экосистем: ботанического сада, участков малоэтажной и многоэтажной застройки. По результатам измерений в 2023 и 2024 гг. установлено, что урбанизированные экосистемы Белгорода на исследуемой территории имеют положительный баланс потоков углерода в атмосферном воздухе на протяжении всего года, но в мае баланс близок к нейтральному. Выявлены особенности годичной динамики чистого экосистемного обмена, её статистические характеристики, в том числе цикличность разной размерности. Среднегодовой уровень потоков углекислого газа в 2023 году составил $3,46 \pm 14,07$ мкмоль/м²·с, в 2024 году $3,52 \pm 9,54$. Измерения были дополнены регистрацией климатических параметров, что было учтено в интерпретации данных за исследуемый период. Полученные результаты обосновывают целесообразность ведения мониторинга потоков атмосферного углерода в городских экосистемах: в теоретическом отношении – в связи со значительным объёмом новой научной информации, практическом отношении – для контроля эффективности мер, направленных на экологическую оптимизацию городской среды.

Ключевые слова: городские экосистемы, углекислый газ, углеродный баланс, чистый экосистемный обмен, метод турбулентных пульсаций, эколого-климатические станции, карбоновый полигон

Благодарности: исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-17-00169 (<https://rscf.ru/project/23-17-00169/>).

Для цитирования: Голеусов П.В. 2025. Результаты мониторинга концентрации и потоков углекислого газа в г. Белгороде (2023–2024 гг.). Региональные геосистемы, 49(3): 462–476. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-462-476 EDN: ЛЮРСА

Results of Monitoring Carbon Dioxide Concentrations and Fluxes in Belgorod (2023–2024)

Pavel V. Goleusov

Belgorod State National Research University,
85 Pobedy St, Belgorod 308015, Russia
goleusov@bsuedu.ru

Abstract. The article presents the results of monitoring carbon dioxide fluxes in urban conditions using the eddy covariance method. The site under study was the carbon polygon of Belgorod State National

© Голеусов П.В., 2025

Research University located in the South-West district of Belgorod and operated by the University's Regional Center for Carbon Balance Monitoring. The monitoring scheme includes measurements at two levels of ecological and climatic stations (ECSs) installed on the tower at heights of 10 metres and 49 metres. The ECS located at the 10-metre height provides measurements of the experimental site of the polygon in the botanical garden, while the one located at the 49-metre height covers the area at the junction of the botanical garden and urban territory with low-rise and high-rise buildings. The measurements conducted in 2023 and 2024 showed a positive balance of carbon fluxes in the atmospheric air throughout the year, though in May the balance was close to neutral. The study revealed features of annual dynamics of net ecosystem exchange and its statistical characteristics, including cyclicity of different dimensions. The average annual level of carbon dioxide fluxes was $3.46 \pm 14.07 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ in 2023 and $3.52 \pm 9.54 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ in 2024. The measurements were supplemented by the registration of climatic parameters, which was taken into account in the interpretation of the data for the study period. The research results substantiate the feasibility of monitoring atmospheric carbon flows in urban ecosystems. In theoretical terms, its importance is explained by large amounts of new scientific information, while from the practical perspective, this monitoring will make it possible to control the effectiveness of measures aimed at environmental optimization of the urban environment.

Keywords: urban ecosystems, carbon dioxide, carbon balance, net ecosystem exchange, eddy covariance method, eddy covariance stations, carbon polygon

Acknowledgements: The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project No. 23-17-00169 (<https://rscf.ru/project/23-17-00169/>).

For citation: Goleusov P.V. 2025. Results of Monitoring Carbon Dioxide Concentrations and Fluxes in Belgorod (2023–2024). *Regional Geosystems*, 49(3): 462–476 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-3-462-476 EDN: JIOPCA

Введение

Города являются наиболее несбалансированными экосистемами в отношении потоков углерода, в связи с большим сосредоточением техногенных источников выбросов оксидов углерода (CO_2 , CO), метана и других углеводородов. На урбанизированные территории приходится более 70 % антропогенных выбросов парниковых газов (ПГ), причём среди их источников доминирует энергетический сектор [Wei et al., 2021]. Городские территории России составляют чуть более 2 % от площади всех городов мира (19,5 тыс. км², 10-е место) [Our World..., 2025], но по выбросам парниковых газов страна занимает 4-е место [EDGAR, 2023], а Москва – 7-е – среди мегаполисов мира [Wei et al., 2021].

В Центрально-Чернозёмном районе (ЦЧР), по данным ресурса *Climate trace* за 2024 год, крупнейшим источником (федерального уровня) выбросов парниковых газов в CO_2 -эквиваленте является Липецк (31,14 млн т в год), за счёт деятельности Новолипецкого металлургического комбината. Другие областные центры ЦЧР имеют существенно меньший уровень годовых выбросов: Воронеж – 5,99, Белгород – 4,01, Курск – 3,59, Тамбов – 2,02 млн т в год (при этом заметим, что *Climate trace* учитывает далеко не все источники выбросов). В Белгороде среди техногенных источников эмиссии ПГ доминируют ТЭЦ и котельные, на втором месте – предприятия строительной индустрии. По данным Белгородстата, в городе насчитывается около 5000 га зелёных насаждений, что составляет 30,4 % его территории. По результатам инвентаризации, проведённой в 2023 году АНО «Зеленая инфраструктура городов», городских древесно-кустарниковых насаждений существенно меньше – 2 219 га. Очевидно, что зелёные насаждения города не могут в сколько-нибудь значимой степени компенсировать выбросы углекислого газа на его территории, но смягчить углеродный дисбаланс в некоторой степени могут, наряду с выполнением других не менее важных экологических функций. Это определяет актуальность ведения мониторинга эмиссии и поглощения углекислого газа на городских территориях. Кроме того, повышенное содержание углекислого газа, наличие «островов тепла», городского освещения, загряз-



нения воздуха и почв, а также специфические требования к озеленению города формируют условия, для которых необходимо искать нестандартные решения по экологической компенсации углеродного дисбаланса. Функцию мониторинговых и экспериментальных площадок в этой связи могли бы выполнять городские карбоновые полигоны.

Сеть карбоновых полигонов – это российское нововведение в деятельность научных организаций, внедряемое соответствующим проектом Минобрнауки с 2021 года [Карбоновые полигоны ..., 2025], в дополнение к существовавшей с 2010-х гг. сети эколого-климатических станций (ЭКС), которые вели измерения потоков ПГ в рамках отдельных научных проектов. На 2022 год общероссийская сеть мониторинга экосистемных потоков ПГ RuFlux включала 22 станции [Куричева и др., 2023]. По данным Каталога эколого-климатических станций [2025] насчитывается 35 ЭКС. RuFlux курирует Лаборатория Биогеоценологии им. В.Н. Сукачёва Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (ИПЭЭ РАН) [Мониторинг..., 2025]. В дальнейшем предполагается интеграция этой сети с сетью карбоновых полигонов [Куричева и др., 2023]. Отметим, что и станции RuFlux, и карбоновые полигоны организованы преимущественно в природных экосистемах и ориентированы на установление возможностей России в поглощении парниковых газов, в первую очередь за счёт таёжных – лесных и болотных – экосистем. ЭКС в антропогенно-модифицированных экосистемах (агроландшафты, в т. ч. постагрогенные экосистемы) немногочисленны. Собственно, «городских» станций (т. е. расположенных непосредственно в городских кварталах) среди них нет, но есть станции в городской черте (например, карбоновый полигон Чеченской Республики). На ресурсе «Карбоновые полигоны Российской Федерации» [О проекте ..., 2025] прямо указывается, что «... полигоны – это тестовые площадки на **неурбанизированных территориях**, на которых разрабатывают и испытывают технологии измерения, мониторинга и контроля парниковых газов». Во многом такой подход определяется особенностью используемого метода измерения углеродного баланса – метода турбулентных пульсаций (МТП) [Бурба и др., 2016], для которого одним из требований является однородность подстилающей поверхности в зоне формирования измеряемых турбулентных потоков. Для города это требование невыполнимо, за исключением крупных массивов городских лесов на относительно ровном рельефе. В зарубежных исследованиях такое ограничение метода (в англоязычной среде – метод «eddy covariance», вихревых ковариаций) учитывается, а неровная поверхность городов считается главным фактором неопределённости в формировании потоков ПГ [Feigenwinter et al., 2012; Crawford, Christen, 2015], но как непреодолимое препятствие не рассматривается. Например, эта методологическая проблема может быть решена при проведении синхронных измерений двумя ЭКС в одной точке городского пространства [Järvi et al., 2018].

Обзор использования МТП в городских условиях дан в работе [Li et al., 2024], на основе анализа 127 статей, находящихся в базе данных Web of Science и опубликованных в период с 2009 по 2022 год. Авторы отмечают дискуссионность применимости и необходимость совершенствования методики измерения радиационного баланса и потоков ПГ в городах, но также – целесообразность создания международной сети городских ЭКС и ведения долгосрочных наблюдений за городскими потоками ПГ. К настоящему времени уже есть длинные ряды данных, полученных с помощью МТП в крупных городах. Например, в Базеле (Швейцария) измерения МТП проводятся с 2005 года на 18-метровой башне, установленной прямо на крыше 20-метрового здания Лаборатории метеорологии, климатологии и дистанционного зондирования Базельского университета [Schmutz et al., 2016]. Следует отметить, что эти исследования в виде проекта «Urban carbon dioxide Flux Monitoring using Eddy Covariance and Earth Observation» [2025] были в 2019–2022 гг. поддержаны грантом Евросоюза CORDIS. В результате участниками проекта были разработаны методологические принципы измерений МТП в городах [Stagakis et al., 2022, 2023]. Согласно препринту американских авторов [Horne et al., 2025], в рамках проекта «The Indianapolis Flux Experiment (INFLUX)» в Индианаполисе измерения проводятся с 2013 года тремя башнями eddy covariance высотой 30, 41 и 43 м, установленными в разных районах города. В Вене оборудование для мониторинга потоков

ПП установлено на башне радиовещания «А1 Арсенал» на высоте 144 м [Matthews, Schume, 2022]. В целом высота расположения ЭКС имеет значение для неопределённости измерений МТП в городах: чем выше, тем более генерализованным будет измерение потоков для городского ландшафта. Например, в Пекине ЭКС расположены на высотах 47, 140, 280 м на башне общей высотой 325 м [Huizhi et al., 2012]. Но в Бари (Италия) вполне кондиционные результаты были получены на станции, установленной на крыше 12-метрового здания, на штативе высотой 5,5 м, т. е. на уровне 17,5 м над улицей [Rana et al., 2021].

В России проект создания городского карбонового полигона был поддержан в рамках участия Белгородского государственного национального университета (НИУ «БелГУ») в конкурсе Минобрнауки «Приоритет-2030» в 2022 году. Полигон был создан на площадке ботанического сада НИУ «БелГУ» и проводит измерения потоков CO_2 с ноября 2022 года. Оператором является Региональный центр мониторинга углеродного баланса НИУ «БелГУ». Далее будут рассмотрены результаты измерения концентрации и потоков углекислого газа в г. Белгороде в 2023–2024 гг., полученные с помощью МТП на двух станциях, установленных на башне высотой 50 м. Они дополняют опубликованные ранее материалы [Голеусов, 2024].

Объекты и методы исследования

Выбор расположения карбонового полигона в Белгороде определялся возможностью проведения измерения потоков углерода как на квазиприродной территории с экспериментальными изменениями структуры экосистемы, так и на участке городской территории, включающей транспортные магистрали, зоны одноэтажной и многоэтажной застройки, но без прямого воздействия (ближе 2 км) крупных источников выбросов CO_2 (котельных, ТЭЦ, производств). Также важно было учесть режим циркуляционных процессов, определяемый рельефом города – в Белгороде он довольно неоднороден. В этом отношении предпочтительнее были возвышенности по сравнению с долинами рек. Этим установкам соответствует ботанический сад НИУ «БелГУ», расположенный на реки Везёлки (Болхолец) и её правого притока – Гостянки (Гостёнки), с отметками рельефа от 128 до 188 м н. у. м.

Ботанический сад НИУ «БелГУ» был создан в 1999 году, он является ООПТ регионального значения. До этого участок представлял собой сельскохозяйственные угодья и древесные насаждения защитного типа. В настоящее время основную часть ботанического сада (45 га) занимает культурный ландшафт, выполняющий культурно-просветительскую, исследовательскую и производственную функцию. В нём выделяется 2 функциональные зоны: экспериментально-производственная (питомники, опытные поля, оранжерейно-тепличное хозяйство, экспериментальные участки, хоздвор и т. п.) и экспозиционно-парковая (коллекции живых растений).

В северо-западной части ботанического сада в 2022 году, на месте рекультивированной свалки (преимущественно строительных отходов), на абс. отм. 185 м была возведена свободностоящая башня из металлоконструкций (мобильная антенная опора) МАО-50-КМ1 высотой 50 м. Превышение рельефа в месте установки над центральной частью города – долинами рр. Везёлка и Северский Донец составляет 66–70 м. С учётом высоты конструкции уровень фоновых водоразделов (до 220 м) превышен на 15 м. Площадь ботанического сада составляет 71 га и практически полностью охвачена измерениями ЭКС_49. Координаты центроида карбонового полигона: 50,5932083 с.ш., 36,5357052 в.д.

На рис. 1 представлены зоны охвата измерений ЭКС полигона, установленными на высоте 10 и 49 м. Площадь зоны охвата (90 % потоков) ЭКС_10 составляет в среднем 2,1 га и обеспечивает измерение на экспериментальной площадке полигона. Её средний радиус оставляет 84 ± 28 м. Площадь зоны охвата ЭКС_49 радиусом 734 ± 408 м в среднем составляет 168,0 га. Особенностью МТП является варьирование размеров зоны охвата, в зависимости от атмосферных условий: в стабильных условиях она возрастает, в нестабильных – сокращается [Бурба и др., 2016]. Коэффициент годичной вариации протяжённости зоны охвата для станции 10 м составляет 11 %, для станции 49 м – 19 %.

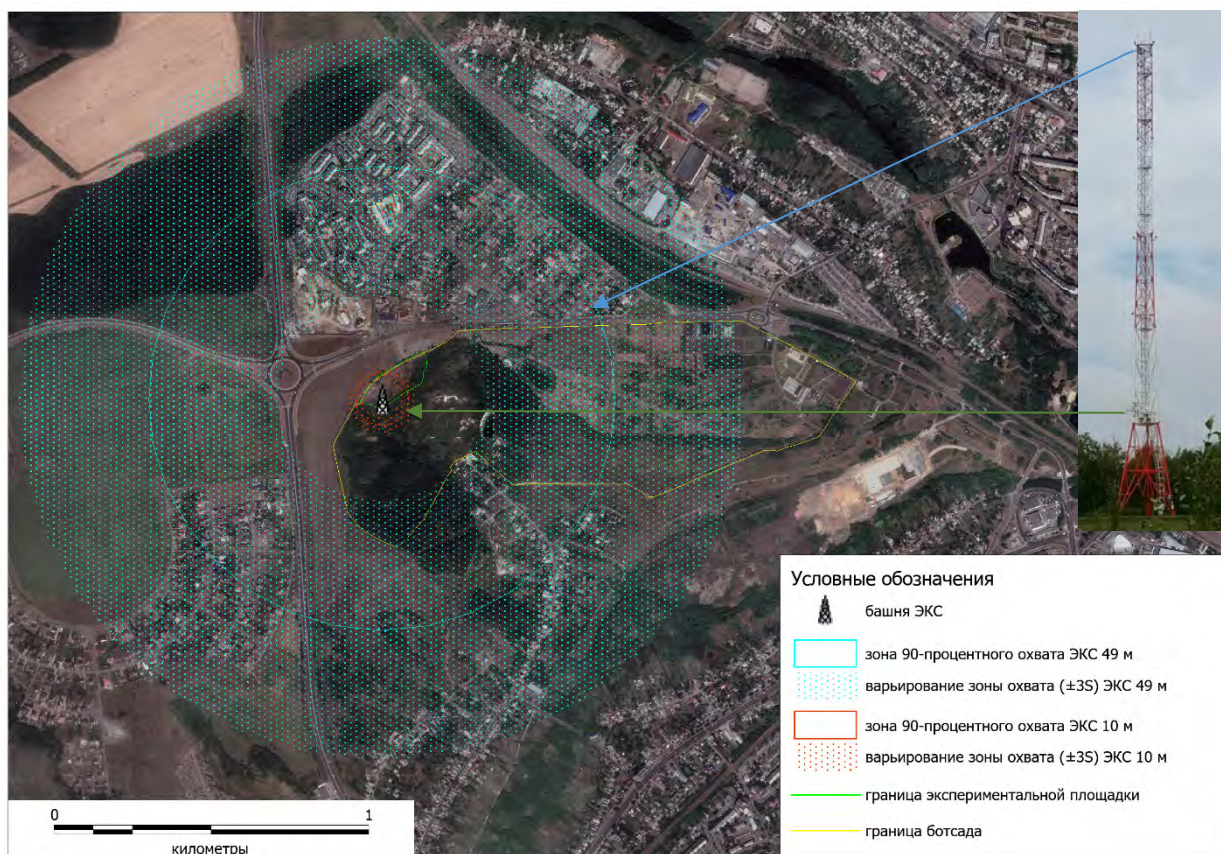


Рис. 1. Зоны охвата эколого-климатических станций карбонового полигона НИУ «БелГУ» на космическом снимке (GoogleEarth)

Fig. 1. Footprint of eddy covariance stations in Belgorod State University carbon polygon on a satellite image (GoogleEarth)

Структура зоны охвата ЭКС_10 относительно однородна как по рельефу, так и по растительному покрову. Она на 52 % представлена травянистыми сообществами, на 48 % – древесными насаждениями (преимущественно берёзой повислой, клёном остролистным и ясенем пенсильванским). В перспективе соотношение между травянистой и древесной растительностью будет меняться в сторону увеличения доли последней в связи с посадками тополя Симона и клёна остролистного, которые выбраны в качестве модельных видов. Почвенный покров экспериментального участка представлен различными антропогенными почвами (технозёмы, реплантозёмы) и антропогенно-преобразованным (нарушенным при лесопосадках) чернозёмом типичным. Непосредственно на месте установки башни почвенный покров был восстановлен с использованием материала гумусового горизонта чернозёма типичного, причём на месте закладки почвенных датчиков – он послойно перенесён из лесопосадки на полную мощность гумусового горизонта (A+AB) объёмом 6 м³. На опытной делянке карбонового полигона площадью 1200 м² развёрнуты эксперименты по разработке технологий ускоренного накопления углерода в почве.

Зона охвата станции 49 м на 33 % застроена, из них 10 % – многоэтажная застройка (микрорайон «Новая Жизнь»). В дальнейшем доля многоэтажной застройки будет возрастать (строится микрорайон «Жемчужина»), что позволит исследовать влияние изменения соотношения разных типов застройки и квазиприродных экосистем на характеристики углеродного баланса. В зону охвата станции 49 м попадает крупная автомагистраль города (ул. Механизаторов) с круговым движением. Среди других источников антропогенных выбросов стоит выделить выбросы индивидуальных систем отопления частного сектора. Крупные котельные и ТЭЦ в зоне охвата отсутствуют, но их влияние в измерениях зарегистрировано.

Климатические условия участка исследования умеренно-континентальные, среднегодовая температура для климатической нормы (1991–2020 гг.) $7,7^{\circ}\text{C}$, годовое количество осадков 526 мм (по данным АМСГ Белгород, индекс ВМО 34214) [Архив погоды ..., 2025]. Однако в период измерений отмечено отклонение в сторону потепления ($9,0^{\circ}\text{C}$ в 2023 году и $10,4^{\circ}\text{C}$ в 2024 году). В 2023 году осадков выпало больше климатической нормы – 754 мм, в 2024 – меньше, 406 мм. Особенно засушливым был летне-осенний период 2024 года. Для зимнего сезона преобладающие скорости ветра находятся в интервале 4–5 м/с, средняя скорость составляет 4 м/с. Максимальная повторяемость характерна для ветров западного и юго-западного направления, следующими по повторяемости являются восточные ветры. Для летнего сезона преобладающие скорости ветра находятся в интервале 2–3 м/с, средняя скорость составляет 2,6 м/с. В летний сезон наблюдается достаточно равномерное распределение направлений ветра, с незначительным преобладанием ветров с северной составляющей. Годовые розы ветров представлены на рис. 2.

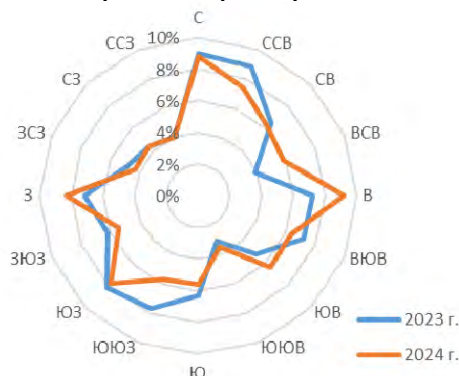


Рис. 2. Розы ветров периода исследований
Fig. 2. Wind roses of the research period

Преобладающие направления ветров были учтены при выборе расположения башни с ЭКС. Дифференциация зоны охвата по секторам розы ветров позволяет вести мониторинг углеродного баланса различных типов городских экосистем, разных участков ботанического сада и экспериментальной площадки карбонового полигона, а также вычленить влияние автотранспорта и других техногенных источников на динамику потоков CO_2 .

ЭКС карбонового полигона оборудованы системами *eddy covariance* на основе газоанализаторов $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ закрытого типа LI-7200RSF (LI-COR) в комплексе с цифровыми ультразвуковыми анемометрами *uSonic-3 Cage MP (METEK)*, наборами датчиков серии *Biomet (LI-COR)*. Измерения концентрации CO_2 и параметров ветра производятся с частотой 10 Гц. Обработку данных проводили с помощью программного обеспечения *EddyPro-7.0.9* с усреднением для 30-минутных интервалов, в соответствии с рекомендациями, изложенными [Бурба и др., 2016]. В данной статье анализируются среднегодовые и среднемесячные значения концентрации и потоков CO_2 , а также данные станции *Biomet* (температура, относительная влажность воздуха, радиационный баланс, объёмная влажность почвы). Относительно непрерывные ряды измерений концентрации и потоков CO_2 для ЭКС_10 представлены с февраля 2023 года по апрель 2024 года. Для ЭКС_49 – с января 2023 года по ноябрь 2024 года. Статистическую обработку данных проводили с использованием программ *MS Excel* и *Statistica*.

Результаты и их обсуждение

Климатические параметры, измеренные станциями в 2023 и 2024 гг., представлены на рис. 3. Как было отмечено выше, эти годы были заметно теплее климатической нормы, причём по данным собственных измерений ЭКС, отличия были более существенны, чем по данным АМСГ Белгород, расположенной на северной окраине города. Это подтверждает наличие «теплового острова» над его центральной частью. Радиационный баланс в 2023 и 2024 гг.

за период с температурой выше $+10^{\circ}\text{C}$ составил в среднем 119 и 127 Вт/м^2 , соответственно, для ЭКС_10; 106 и 108 Вт/м^2 – для ЭКС_49. В 2024 году в этот период установилась засуха, особенно в августе – октябре, которые были практически без осадков, о чём свидетельствует годовое распределение показателя среднемесячной относительной влажности воздуха и объёмной влажности почвы (рис. 3В, Г). Это привело к гибели большей части саженцев тополя Симона и клёна остролистного, высаженных в 2023 году.

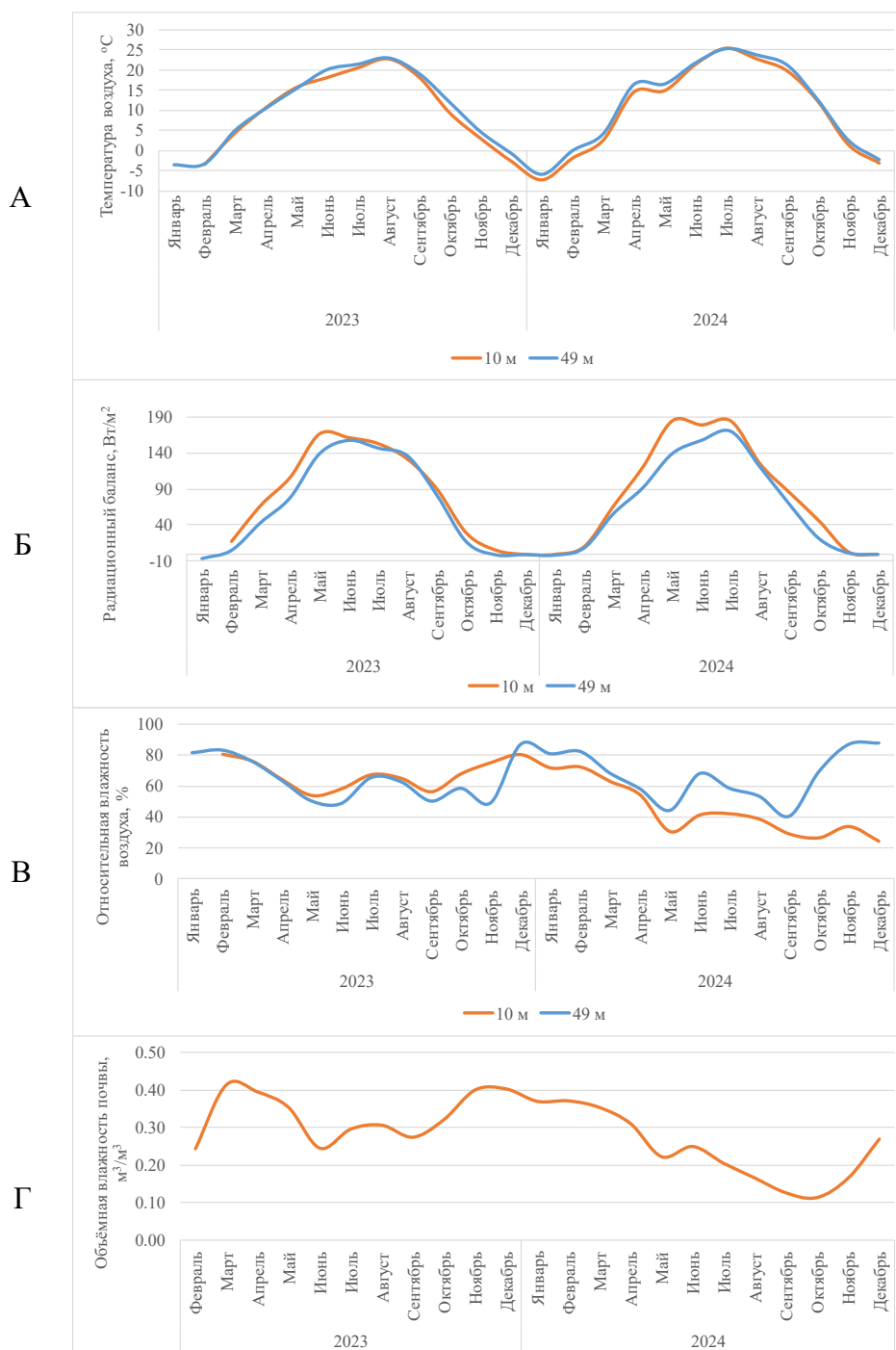
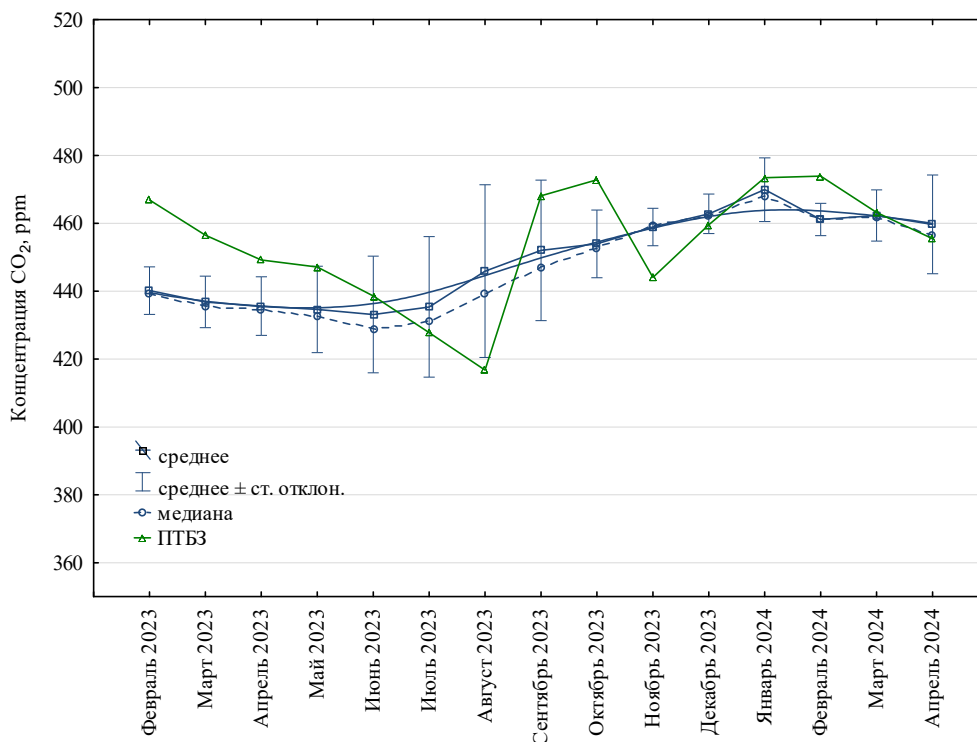


Рис. 3. Некоторые климатические характеристики периода измерений: А – температура воздуха; Б – радиационный баланс; В – относительная влажность воздуха; Г – объёмная влажность почвы (на глубине 10 см, ЭКС_10)

Fig. 3. Some climatic characteristics of the measurement period: А – air temperature; Б – radiation balance; В – relative air humidity; Г – volumetric soil moisture (at a depth of 10 cm, ECS_10)

Рассмотрим годовую динамику среднемесячной концентрации углекислого газа, измеренной в 2023 и 2024 гг. и представленную на рис. 4. В качестве мер варьирования данного показателя за месяц и за год использованы величина стандартного отклонения и коэффициент вариации.

А



Б

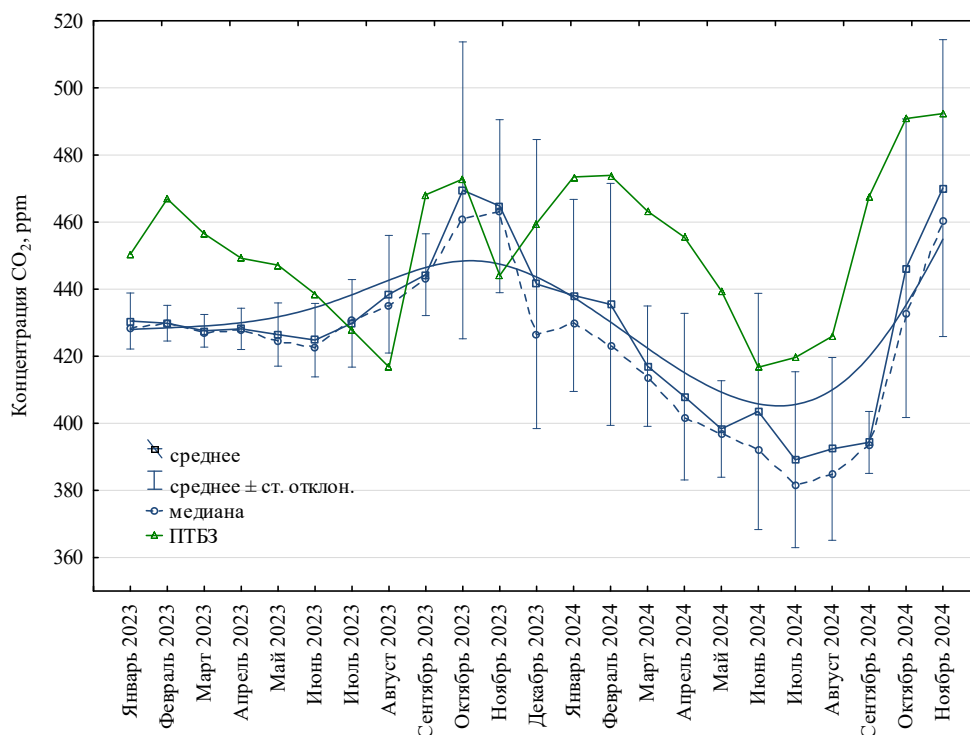


Рис. 4. Динамика среднемесячной концентрации углекислого газа на ЭКС_10 (А) и ЭКС_49 (Б) в сравнении с годовым ходом концентрации CO_2 в Приокско-Тerrasном биосферном заповеднике (ПТБЗ) [Доклад..., 2024, 2025]

Fig. 4. Dynamics of average monthly concentration of carbon dioxide at ECS 10 m (А) and ECS 49 m (Б) in comparison with the annual course of CO_2 concentration in the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve [Report..., 2024, 2025]

Среднегодовая концентрация CO_2 , измеренная на высоте 10 м в 2023 году составила 445 ± 18 ppm, коэффициент вариации 4 %. На высоте 49 м среднегодовая концентрация в 2023 году составила 435 ± 23 ppm, а в 2024 году 416 ± 38 ppm. Коэффициенты вариации, соответственно, 5 и 9 %. Диапазоны варьирования среднегодовых концентраций перекрываются, что не позволяет делать вывод о достоверных тенденциях. Концентрация CO_2 закономерно снижается с высотой, а степень варьирования несколько возрастает. Для выявления согласованности годовой динамики среднемесячных концентраций с «природной динамикой» использовали данные ЭКС Приокско-Тerrasного биосферного заповедника (ПТБЗ) – наиболее близкой по местоположению из пяти станций, данные которых публикуются Росгидрометом [Доклад..., 2024, 2025]. Динамика по ЭКС_10 согласована с рядом ПТБЗ на 35 %, по ЭКС_49 – на 24 % (в обоих случаях корреляция значима при $p = 0,95$). Минимальные концентрации CO_2 в городских экосистемах, как и в природных, достигаются в середине вегетационного периода, а максимальные – в конце осени, когда совпадают природные и техногенные эмиссионные потоки (отопительный сезон).

Особый интерес вызывает анализ цикличности динамики концентрации углекислого газа в городских экосистемах в вегетационный период, так же как и ацикличности – в зимний период. В вегетационный период очевидно наличие суточного цикла, обусловленного фотосинтезом, он является базовым, остальные – фоновыми. На рис. 5 представлена месячная динамика для мая – месяца, для которого зарегистрированы также наиболее значимые поглощения CO_2 . Динамика концентрации на уровнях 10 и 49 м происходит согласованно, коэффициент корреляции $0,48 \pm 0,05$, при этом отмечается лаг 3–5 часов между пиками уровней. Это связано с атмосферной дисперсией углекислого газа, поступающего из низких источников. Формы пиков могут иметь различия: более сглаженные или более островершинные (см. рис. 5), причём островершинными являются максимальные пики, что связано с влиянием техногенных источников. Природная динамика – более пологая. Этот факт подтверждается анализом направлений ветра и зон охвата.

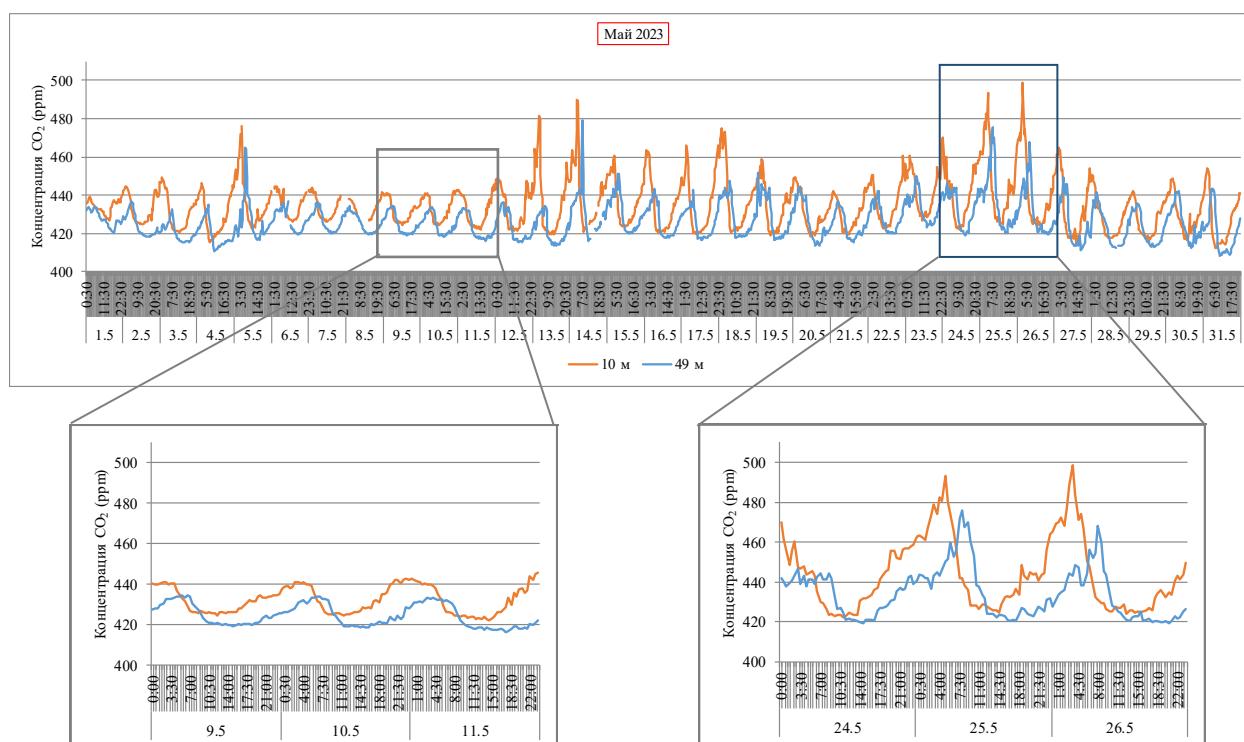


Рис. 5. Месячная динамика концентрации углекислого газа в мае 2023 года на ЭКС 10 и 49 м с детализацией форм пиков

Fig. 5. Monthly dynamics of carbon dioxide concentration in May 2023 at ECSs located at 10 m and 49 m with details of peak shapes

В зимний период суточная динамика практически отсутствует (рис. 6), а на уровне 10 м вообще имеет вид «белого шума». В целом она определяется техногенными источниками и процессами переноса воздушных масс. На высоте 49 м методом Фурье-анализа выявляются недельные и декадные циклы, спектральная плотность которых намного выше, чем у суточного цикла. Анализ данных ЭКС_49 в зимний период позволяет более точно выявить влияние техногенных источников. Например, самый большой пик концентрации 01.12.2023 был, по всей видимости, обусловлен влиянием котельной Южной – одного из самых мощных городских источников.

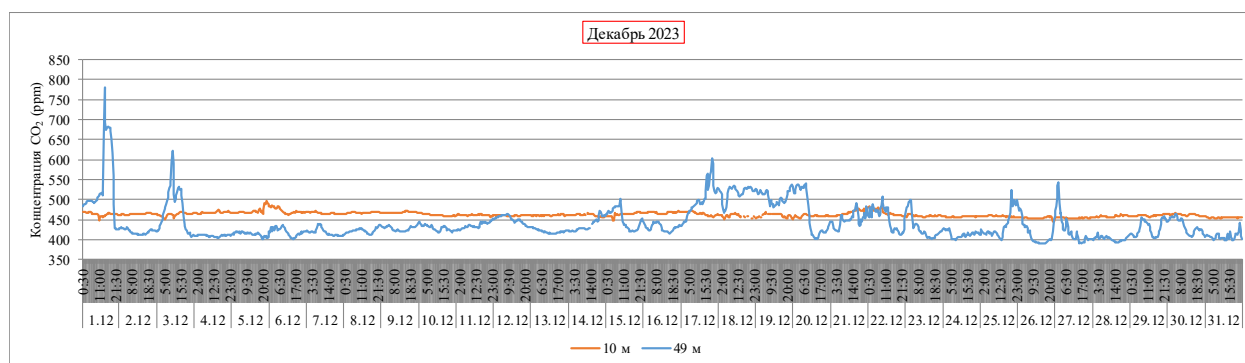


Рис. 6. Месячная динамика концентрации углекислого газа в декабре 2023 года на ЭКС 10 и 49 м
Fig. 6. Monthly dynamics of carbon dioxide concentration in December 2023 at ECSs located at 10 m and 49 m

Рассчитанные на основе измерений ЭКС потоки углекислого газа характеризуют чистый экосистемный обмен (*net ecosystem exchange, NEE*) зоны охвата, т. е. баланс вертикальных потоков, обусловленных эмиссией и поглощением CO_2 . В городах он, как правило, положительный, за исключением локальных экосистем древесных насаждений и, возможно, водоёмов.

С увеличением зоны охвата возрастает количество источников эмиссии, поэтому экосистемное дыхание, определённое с помощью ЭКС_49, втрое больше, чем для ЭКС_10. В 2023 году на площадке карбонового полигона NEE составил в среднем $1,14 \pm 5,54$ мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Максимальные значения характерны для октября и ноября, минимальные – для мая и июня (рис. 7А). Следует отметить, что медианные значения NEE в отрицательную область не заходят на протяжении всего года, таким образом, лишь в мае площадка карбонового полигона была относительно углеродно-нейтральной. Максимальное среднесуточное поглощение CO_2 зарегистрировано 17.05.2023 г. $NEE = -6,07 \pm 7,96$ мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Максимальная эмиссия – 20.11.2023 г., когда NEE составил в среднем $5,21 \pm 3,29$ мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Для ЭКС_49 удалось сформировать практически двухлетний ряд наблюдений, согласно которым в 2023 и 2024 гг. среднегодовой уровень NEE оставался практически неизменным: $3,46 \pm 14,07$ (2023 год) и $3,52 \pm 9,54$ мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ (2024 год). Обращает на себя внимание более широкий диапазон варьирования показателя этой станции (см. рис. 7Б) по сравнению с ЭКС_10, что связано как с более неоднородной зоной охвата, так и с более значительным варьированием концентрации CO_2 на высоте 49 м. Также, как и на высоте 10 м, отмечается некоторая компенсация эмиссии во время вегетационного периода, наиболее интенсивная в мае. Максимальное среднесуточное поглощение в зоне охвата ЭКС_49 зарегистрировано 30.05.2024 г. $NEE = -5,28 \pm 9,68$ мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Максимальная среднесуточная эмиссия отмечена 28.11.2024 г., $NEE = 9,74 \pm 10,38$ мкмоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$. В 2024 году, в связи с засушливыми условиями второй половины лета, экосистемы города быстрее вернулись к эмиссионному типу углеродного баланса, чем в 2023 году.

Уровень эмиссионных потоков, измеренных на Белгородском карбоновом полигоне, соответствует уровню пригородных зон, т. к. в центральных районах крупных мегаполисов среднесуточный NEE может достигать 80–100 мкмоль/м²·с, а среднегодовой — до 38 мкмоль/м²·с [Ward et al., 2015; Min et al., 2022].

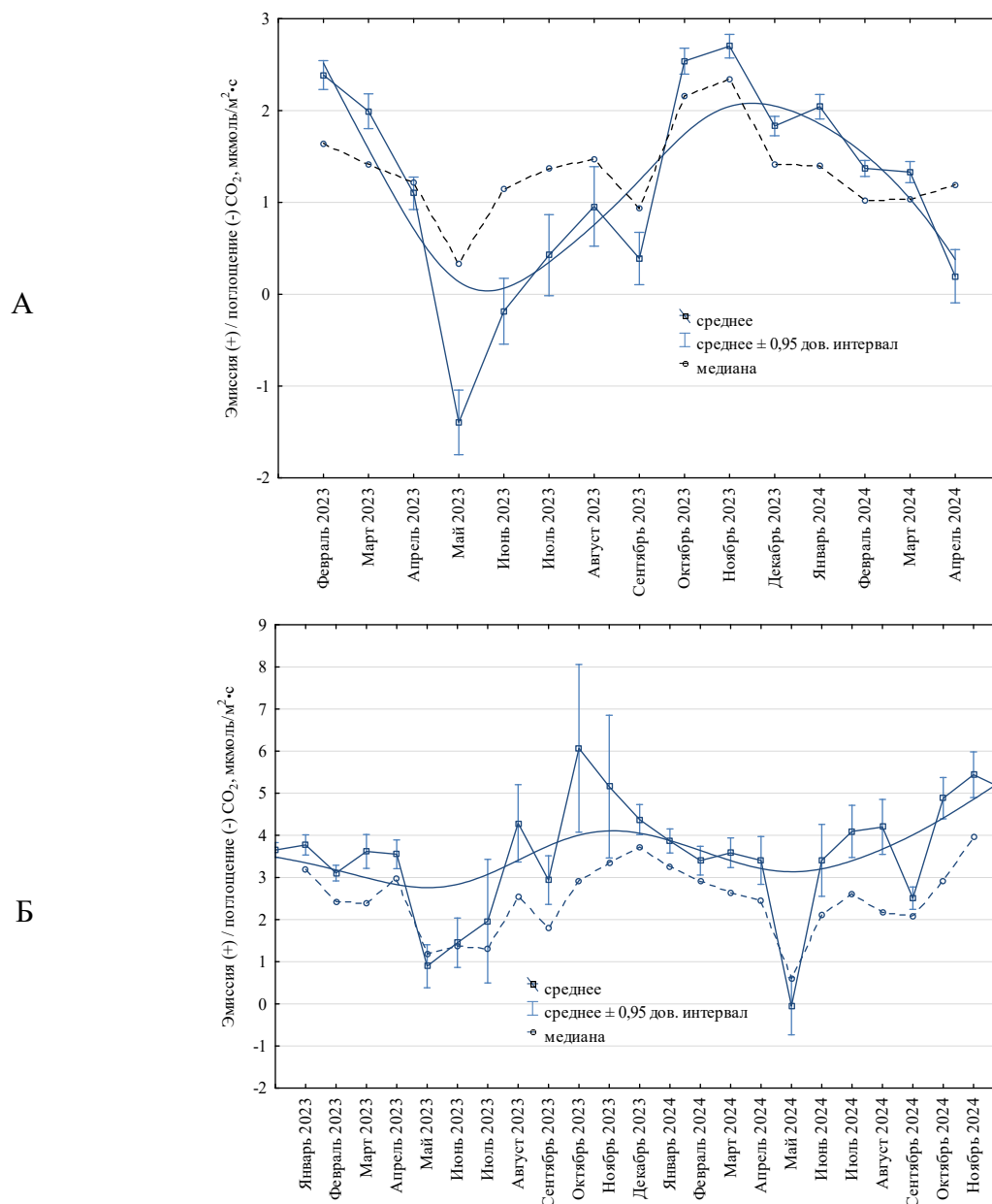


Рис. 7. Среднемесячные потоки углекислого газа на карбоновом полигоне НИУ «БелГУ», рассчитанные для высот 10 м (А) и 49 м (Б)

Fig. 7. Average monthly carbon dioxide flux at the carbon polygon of Belgorod State University, calculated for heights of 10 m (A) and 49 m (B)

В России подобных измерений немного. Близкие результаты получены на карбоновом полигоне Чеченской Республики, на сходном участке (антропогенно нарушенном, а затем рекультивированном): диапазон варьирования потоков CO₂ составил от –1 до 6 мкмоль/м²·с, при этом эмиссионные потоки преобладали на протяжении всего периода измерений [Сатосина и др., 2023]. Для другого участка карбонового полигона «Зелёная зона г. Грозный» (ООПТ), расположенного в городской черте, но в широколиственном лесу, за период наблюдений с апреля по ноябрь 2023 года, максимальное поглощение также было зарегистрировано в мае, а в остальные месяцы эмиссия превышала поглощение [Братков, Бекмурзаева, 2025].

Таким образом, средневозрастные городские насаждения (как на карбоновом полигоне НИУ «БелГУ»), как и средневозрастные естественные лесные экосистемы (как на Чеченском карбоновом полигоне), неэффективны в отношении компенсации углеродного дисбаланса. Дальнейшие эксперименты покажут, способно ли омоложение насаждений с использованием наиболее «поглощающих» видов улучшить показатели NEE в условиях города.

Заключение

В России исследования углеродного баланса урбанизированных ландшафтов не являются распространённым научным направлением, в связи с приоритетностью решения задачи оценки поглотительной способности природных экосистем. Режимы функционирования антропогенно преобразованных экосистем менее изучены, а результаты исследований имеют большую практическую значимость с точки зрения управления природными процессами. За рубежом исследования потоков парниковых газов на урбанизированных территориях довольно распространены, но в отношении метода турбулентных пульсаций ограничены методологическими проблемами, связанными с большой неоднородностью зон охвата измерений. Вместе с тем именно городские экосистемы сильнее всего нуждаются в компенсации углеродного дисбаланса путём применения природоподобных технологий. Поэтому создание исследовательских (для которых задача мониторинга потоков ПГ не главная) карбоновых полигонов в городах вполне обосновано. Такой профиль деятельности был принят для Белгородского карбонового полигона, созданного в 2022 году на базе НОЦ «Ботанический сад НИУ «БелГУ».

Измерения, проведённые на различающихся по площади зон охвата ЭКС карбонового полигона, на высотах 10 и 49 м в 2023 и 2024 гг. показали относительно стабильный положительный баланс углекислого газа в атмосферном воздухе Юго-Западного района г. Белгорода, соответствующий уровню пригородных зон. Зелёные насаждения ботанического сада компенсируют эмиссионные потоки в период с мая по июль, но полностью их не перекрывают, что предполагает поиск более эффективных решений для озеленения городских территорий. На протяжении всего года, за исключением мая, озеленённые городские экосистемы (подобные ботаническому саду НИУ «БелГУ») имеют эмиссионный статус.

С учётом развития жилой застройки территории, охваченной мониторингом, а также экспериментальных работ на карбоновом полигоне НИУ «БелГУ», в дальнейшем могут быть проведены исследования влияния изменения состояния зон охвата на баланс CO₂ в атмосфере Белгорода. Накопленные эмпирически данные формируют основу для выявления пространственных и временных закономерностей углеродного баланса в условиях урбанизированного ландшафта.

Список источников

- Архив погоды в Белгороде / им. В.Г. Шухова (аэропорт). rp5.ru расписание погоды. Электронный ресурс. URL: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Белгороде,_им._В.Г._Шухова_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Белгороде,_им._В.Г._Шухова_(аэропорт)) (дата обращения 20.07.2025).
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. 2024. Москва, 104 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. 2025. Москва, 104 с.
- Карбоновые полигоны. Минобрнауки России. Электронный ресурс. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/> (дата обращения 20.07.2025).
- Каталог эколого-климатических станций России. Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (ИПЭЭ РАН). Электронный ресурс. URL: https://sevin.ru/sites/default/files/2025-06/EC%20буклет_05.2025.pdf (дата обращения 20.07.2025).
- Мониторинг потоков парниковых газов в России. Сайт российской сети экологических наблюдений. Электронный ресурс. URL: <https://ruflux.net/> (дата обращения 20.07.2025).
- О проекте. Карбоновые полигоны Российской федерации. Электронный ресурс. URL: <https://carbon-polygons.ru/about/> (дата обращения 20.07.2025).



EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research. GHG emissions of all world countries. 2023 report. Electronic resource. URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023 (access date: 20.07.2025).

Our World in Data. Urban area over the long-term. Electronic resource. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/urban-area-long-term?tab=table> (access date: 20.07.2025).

Список литературы

- Братков В.В., Бекмурзаева Л.Р. 2025. Оценка запаса и бюджета углерода на участке карбонового полигона «Зелёная зона г. Грозный». Юг России: экология, развитие. 20(1): 107–116. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-1-10>
- Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. 2016. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. М., ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 230 с.
- Голеусов П.В. 2024. Результаты измерения концентрации и потоков углекислого газа в Белгородской агломерации. Московский экономический журнал, 9(1): 114–122. https://doi.org/10.55186/2413046X_2023_9_1_33
- Куричева О.А., Максимов А.П., Максимов Т.Х., Мамкин В.В., Марунич А.С., Мигловец М.Н., Михайлов О.А., Панов А.В., Прокушкин А.С., Сиденко Н.В., Шилкин А.В., Лапшина Е.Д., Курганова И.Н., Авилов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А., Дюкарев Е.А., Загирова С.В., Замолотчиков Д.Г., Зырянов В.И., Карелин Д.В., Карсанаев С.В., Курбатова Ю.А. 2023. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть Ruflux. Известия Российской академии наук. Серия географическая, 87(4): 512–535. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>
- Сатосина Е.М., Мамадиев Н.А., Махмудова Л.Ш., Керимов И.А., Курбатова Ю.А., Ольчев А.В. 2023. Карбоновый полигон Чеченской Республики: IV. Пилотные измерения потоков парниковых газов. Грозненский естественнонаучный бюллетень, 8(2(32)): 53–64. <https://doi.org/10.25744/genb.2023.97.15.008>
- Crawford B., Christen A. 2015. Spatial Source Attribution of Measured Urban Eddy Covariance CO₂ Fluxes. Theoretical and Applied Climatology, 119: 733–755. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1124-0>
- Feigenwinter C., Vogt R., Christen A. 2012. Eddy Covariance Measurements Over Urban Areas. In: Eddy Covariance. Springer Atmospheric Sciences. Ed. by M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale. Springer, Dordrecht: 377–397. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_16
- Horne J.P., Richardson S.J., Murphy S.L., Kenion H.C., Haupt B.J., Ahlswede B.J., Miles N.L., Davis K.J. 2025. Urban Eddy Covariance – The INFLUX Network. Earth System Science Data. Discussion [preprint]. <https://doi.org/10.5194/essd-2025-232>
- Huizhi L., Jianwu F., Jarvi L., Vesala T. 2012. Four-Year (2006–2009) Eddy Covariance Measurements of CO₂ Flux Over an Urban Area in Beijing. Atmospheric Chemistry and Physics, 12(17): 7881–7892. <https://doi.org/10.5194/acp-12-7881-2012>
- Järvi L., Rannik Ü., Kokkonen T. V., Kurppa M., Karppinen A., Kouznetsov R.D., Rantala P., Vesala T., Wood C.R. 2018. Uncertainty of Eddy Covariance Flux Measurements Over an Urban Area Based on Two Towers. Atmospheric Measurement Techniques, 11(10): 5421–5438. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5421-2018>
- Li Y., Cai X., Li M., Jiang Z., Tang F., Zhang S., Shui T., Zhu S. 2024. Review of the Urban Carbon Flux and Energy Balance Based on the Eddy Covariance Technique. Aerosol and Air Quality Research, 24: 230245. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230245>
- Matthews B., Schume H. 2022. Tall Tower Eddy Covariance Measurements of CO₂ Fluxes in Vienna, Austria. Atmospheric Environment, 274: 118941 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118941>
- Min K.-E., Mun J., Perdignes B., Lee S., Kwak K.-H. 2022. Insights on Estimating Urban CO₂ Emissions Using Eddy-Covariance Flux Measurements. Atmospheric Chemistry and Physics. Discussion [preprint]. <https://doi.org/10.5194/acp-2022-205>
- Rana G., Martinelli N., Famulari D., Pezzati F., Muschitiello C., Ferrara R. 2021. Representativeness of Carbon Dioxide Fluxes Measured by Eddy Covariance over a Mediterranean Urban District with Equipment Setup Restrictions. Atmosphere, 12(2): 197. <https://doi.org/10.3390/atmos12020197>
- Schmutz M., Vogt R., Feigenwinter C., Parlow E. 2016. Ten Years of Eddy Covariance Measurements in Basel, Switzerland: Seasonal and Interannual Variabilities of Urban CO₂ Mole Fraction and Flux.

Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(14): 8649–8667.
<https://doi.org/10.1002/2016JD025063>

- Stagakis S., Feigenwinter C., Vogt R., Kalberer M. 2022. A High-Resolution Monitoring Approach of Urban CO₂ Fluxes. Part 1 – Bottom-up Model Development. *Science of the Total Environment*, 858(3): 160216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160216>
- Stagakis S., Feigenwinter C., Vogt R., Brunner D., Kalberer M. 2023. A High-Resolution Monitoring Approach of Urban CO₂ Fluxes. Part 2 – Surface Flux Optimisation Using Eddy Covariance Observations. *Science of the Total Environment*, 903: 166035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166035>
- Ward H.C., Kotthaus S., Grimmond C.S.B., Borgeggen A., Wilkinson M., Morrison W.T.J., Evans J.G., Morison J.I.L., Iamarino M. 2015. Effects of Urban Density on Carbon Dioxide Exchanges: Observations of Dense Urban, Suburban and Woodland Areas of Southern England. *Environmental Pollution*, 198: 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.031>
- Wei T., Wu J., Chen S. 2021. Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3: 696381. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.696381>

References

- Bratkov V.V., Bekmurzaeva L.R. 2025. Assessment of the Carbon Stock and Budget at the Grozny Green Zone Carbon Landfill Site. *South of Russia: ecology, development*. 20(1): 107–116 (in Russian). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2025-1-10>
- Burba G.G., Kurbatova Yu.A., Kuricheva O.A., Avilov V.K., Mamkin V.V. 2016. *Metod turbulentny'kh pul'satsii'. Kratkoe prakticheskoe rukovodstvo* [Method of Turbulent Pulsations. Brief Practical Guide]. Moscow, Publ. Severtsov Institute of Economics and Evolution RAS, 230 p.
- Goleusov P.V. 2024. Measurement Results of Carbon Dioxide Concentrations and Fluxes in the Belgorod Agglomeration. *Moscow Economic Journal*, 9(1): 114–122 (in Russian). https://doi.org/10.55186/2413046X_2023_9_1_33
- Kuricheva O.A., Maksimov A.P., Maksimov T.Kh., 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., Gitarsky M.L., Dmitrichenko A.A., Dyukarev E.A., Zagirova S.V., Zamolodchikov D.G., Zyryanov V.I., Karelin D.V., Karsanaev S.V., Kurbatova Yu.A. 2023. Ruflux: the Network of the Eddy Covariance Sites in Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 87(4): 512–535 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S2587556623040052>
- Satosina E.M., Mamadiev N.A., Makhmudova L.Sh., Kerimov I.A., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. 2023. Carbon Polygon of the Chechen Republic: IV. Pilot Measurements of Greenhouse Gas Flows. *Grozny Natural Science Bulletin*, 8(2(32)): 53–64 (in Russian). <https://doi.org/10.25744/genb.2023.97.15.008>
- Crawford B., Christen A. 2015. Spatial Source Attribution of Measured Urban Eddy Covariance CO₂ Fluxes. *Theoretical and Applied Climatology*, 119: 733–755. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1124-0>
- Feigenwinter C., Vogt R., Christen A. 2012. Eddy Covariance Measurements Over Urban Areas. In: *Eddy Covariance*. Springer Atmospheric Sciences. Ed. by M. Aubinet, T. Vesala, D. Papale. Springer, Dordrecht: 377–397. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_16
- Horne J.P., Richardson S.J., Murphy S.L., Kenyon H.C., Haupt B.J., Ahlswede B.J., Miles N.L., Davis K.J. 2025. Urban Eddy Covariance – The INFLUX Network. *Earth System Science Data*. Discussion [preprint]. <https://doi.org/10.5194/essd-2025-232>
- Huizhi L., Jianwu F., Jarvi L., Vesala T. 2012. Four-Year (2006–2009) Eddy Covariance Measurements of CO₂ Flux Over an Urban Area in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(17): 7881–7892. <https://doi.org/10.5194/acp-12-7881-2012>
- Järvi L., Rannik Ü., Kokkonen T. V., Kurppa M., Karppinen A., Kouznetsov R.D., Rantala P., Vesala T., Wood C.R. 2018. Uncertainty of Eddy Covariance Flux Measurements Over an Urban Area Based on Two Towers. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5421–5438. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5421-2018>
- Li Y., Cai X., Li M., Jiang Z., Tang F., Zhang S., Shui T., Zhu S. 2024. Review of the Urban Carbon Flux and Energy Balance Based on the Eddy Covariance Technique. *Aerosol and Air Quality Research*, 24: 230245. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230245>



- Matthews B., Schume H. 2022. Tall Tower Eddy Covariance Measurements of CO₂ Fluxes in Vienna, Austria. *Atmospheric Environment*, 274: 118941 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118941>
- Min K.-E., Mun J., Perdignes B., Lee S., Kwak K.-H. 2022. Insights on Estimating Urban CO₂ Emissions Using Eddy-Covariance Flux Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics. Discussion [preprint]*. <https://doi.org/10.5194/acp-2022-205>
- Rana G., Martinelli N., Famulari D., Pezzati F., Muschitiello C., Ferrara R. 2021. Representativeness of Carbon Dioxide Fluxes Measured by Eddy Covariance over a Mediterranean Urban District with Equipment Setup Restrictions. *Atmosphere*, 12(2): 197. <https://doi.org/10.3390/atmos12020197>
- Schmutz M., Vogt R., Feigenwinter C., Parlow E. 2016. Ten Years of Eddy Covariance Measurements in Basel, Switzerland: Seasonal and Interannual Variabilities of Urban CO₂ Mole Fraction and Flux. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(14): 8649–8667. <https://doi.org/10.1002/2016JD025063>
- Stagakis S., Feigenwinter C., Vogt R., Kalberer M. 2022. A High-Resolution Monitoring Approach of Urban CO₂ Fluxes. Part 1 – Bottom-up Model Development. *Science of the Total Environment*, 858(3): 160216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160216>
- Stagakis S., Feigenwinter C., Vogt R., Brunner D., Kalberer M. 2023. A High-Resolution Monitoring Approach of Urban CO₂ Fluxes. Part 2 – Surface Flux Optimisation Using Eddy Covariance Observations. *Science of The Total Environment*, 903: 166035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166035>
- Ward H.C., Kotthaus S., Grimmond C.S.B., Borgeggen A., Wilkinson M., Morrison W.T.J., Evans J.G., Morison J.I.L., Iamarino M. 2015. Effects of Urban Density on Carbon Dioxide Exchanges: Observations of Dense Urban, Suburban and Woodland Areas of Southern England. *Environmental Pollution*, 198: 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.031>
- Wei T., Wu J., Chen S. 2021. Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3: 696381. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.696381>

*Поступила в редакцию 25.07.2025;
поступила после рецензирования 28.08.2025;
принята к публикации 09.09.2025*

*Received July 25, 2025;
Revised August 28, 2025;
Accepted September 09, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Голеусов Павел Вячеславович, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. Goleusov, Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Nature Management and Land Cadastre, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia