

ЭКОЛОГИЯ / ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.5>

ЭКОСИСТЕМНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА УЧАСТКАХ С ИЗМЕРЕНИЕМ ПОТОКОВ CO<sub>2</sub> МЕТОДОМ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Научная статья

Манджи О.<sup>1,\*</sup>, Ярославцев А.М.<sup>2</sup>, Васенев И.И.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (osamahmanji[at]gmail.com)

**Аннотация**

Данная статья имеет большую актуальность в связи с растущим интересом к проблемам изменения климата и сохранению экосистемы. Измерение потоков CO<sub>2</sub> между лесной экосистемой и атмосферой является одним из ключевых методов оценки углеродного баланса лесных экосистем. Это позволяет оценить эффективность углеродного поглощения лесами и помогает понять, как изменения климата влияют на процессы углеродного обмена в лесах. Статья также имеет практическую значимость, так как результаты исследований могут использоваться при разработке стратегий управления лесными ресурсами и уменьшения выбросов парниковых газов в атмосферу. Данная статья посвящена исследованию потоков углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в лесных экосистемах Восточной Азии с использованием метода турбулентных пульсаций. В работе описываются результаты исследований, проведенных в Китае, Японии, России и Корее, которые показали значительную изменчивость потоков CO<sub>2</sub> в зависимости от сезона и других факторов. В частности, было выяснено, что летом смешанные леса в Китае являются главным источником CO<sub>2</sub> в атмосферу, в то время как зимой происходит поглощение этого газа. Кроме того, исследование в лесной экосистеме в Корее показало, что увеличение температуры воздуха и среднегодового количества осадков приводит к увеличению потоков CO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** углеродный цикл, лесные экосистемы, потенциал поглощения углерода, изменение климата, мониторинг, метод турбулентных пульсаций.

ECOSYSTEM PROCESSES IN AREAS WITH CO<sub>2</sub> FLUX MEASUREMENT BY EDDY COVARIANCE METHOD IN EAST ASIAN FOREST ECOSYSTEMS

Research article

Manji O.<sup>1,\*</sup>, Yaroslavtsev A.M.<sup>2</sup>, Vasenev I.I.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (osamahmanji[at]gmail.com)

**Abstract**

This article is highly relevant due to the growing interest in climate change issues and ecosystem conservation. Measuring CO<sub>2</sub> fluxes between forest ecosystems and the atmosphere is a key method for assessing the carbon balance of forest ecosystems. It helps evaluate the effectiveness of forest carbon sequestration and understand how climate change affects carbon exchange processes in forests. The article also has practical significance, as the research results can be used to develop forest resource management strategies and reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere. This article focuses on the study of CO<sub>2</sub> fluxes in forest ecosystems in East Asia using the turbulent flux method. The study describes the results of research conducted in China, Japan, Russia, and Korea, which showed significant variability in CO<sub>2</sub> fluxes depending on season and other factors. In particular, it was found that mixed forests in China are the main source of CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere during the summer, while absorption of this gas occurs in winter. Additionally, the research conducted in forest ecosystems in Korea showed that increasing air temperature and average annual precipitation leads to an increase in CO<sub>2</sub> fluxes.

**Keywords:** carbon cycle, forest ecosystems, carbon sequestration potential, climate change, monitoring, eddy covariance method.

**Введение**

В последние годы, в связи с изменением климата, все больше внимания уделяется изучению экосистемных процессов и их влиянию на уровень углекислого газа в атмосфере [1]. Экосистемы, такие как лес, являются важными участниками в углеродном цикле. Леса поглощают углекислый газ в процессе фотосинтеза и удерживают его в форме органического углерода в растительной биомассе и почве.

Данное исследование имеет целью более детально изучить потоки углекислого газа (CO<sub>2</sub>) между лесной экосистемой и атмосферой в различных типах лесов Восточной Азии, используя метод турбулентных пульсаций. Основными задачами исследования являются:

1. Определение изменчивости потоков CO<sub>2</sub> в зависимости от типа леса, сезона, температуры воздуха и количества осадков.

2. Выявление факторов, влияющих на процессы углеродного обмена в лесах, и оценка их вклада в баланс углерода в лесных экосистемах.

3. Сравнение результатов измерений с данными других исследований и анализ полученных результатов для выявления закономерностей и тенденций изменения выделения лесами потоков  $\text{CO}_2$  в различных условиях.

В настоящее время отсутствует единая терминология и методология для метода турбулентных пульсаций. Сети измерительных станций, например, FLUXNET, сыграли важную роль в унификации различных подходов. В данной работе представлен один из стандартных подходов к применению метода турбулентных пульсаций, который является переформулировкой различных существующих подходов.

В период с 2005-2010 годов исследователи, вовлеченные в измерение потоков, достигли значительного прогресса в унификации терминологии и создании общих стандартов обработки данных. Однако сложно обобщить методологию из-за разнообразия измерительных станций и целей исследований, что может привести к модификации метода. Например, если исследование сфокусировано на изучении турбулентности, то поправки на изменение плотности воздуха могут быть избыточными. В данной работе приводятся стандартные подходы к использованию метода турбулентных пульсаций, а также предоставляется информация о более новых, менее распространенных подходах. Если же изучается физиология бактерий, выделяющих метан, то расчет потока импульса и спектров компонентов скорости ветра может быть не столь важным.

Рассмотрим, что такое поток. Он определяется как количество материи, проходящее через единицу площади в единицу времени. Количество исследуемого вещества, проходящего через рассматриваемую площадь, размер площади и временной интервал влияют на поток данной субстанции.

В научной терминологии поток означает количество вещества, проходящего через замкнутую поверхность, например, Гауссову, за единицу времени. Если поток направлен от поверхности в атмосферу, то такую поверхность называют источником, например, поверхность озера, с которой испаряется водяной пар. Если же поток направлен к поверхности, то поверхность называется стоком, например, растительный полог может быть стоком  $\text{CO}_2$  в дневное время, так как зеленые листья поглощают  $\text{CO}_2$  из атмосферы в процессе фотосинтеза.

Для измерения потоков  $\text{CO}_2$  между лесной экосистемой и атмосферой используется метод турбулентных пульсаций [2]. Метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) является одним из ключевых методов мониторинга потоков газов между лесными экосистемами и атмосферой. Он основывается на измерении скорости и концентрации газов в турбулентных потоках, возникающих вблизи поверхности леса.

Строго говоря, существуют различия между терминами "Eddy Covariance" и "Eddy Correlation" на английском языке. Однако "Eddy Covariance" является наиболее подходящим термином для метода, описанного в данной книге. Более подробное описание различий в терминологии можно найти в книге «Метеорология приземного слоя атмосферы» (Т. Foken, "Micrometeorology", 2009).

Данный метод позволяет измерять потоки  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и других газов между атмосферой и лесной экосистемой с высокой точностью и частотой (обычно от 10 до 100 Гц). Это позволяет получать детальную информацию о динамике процессов углеродного обмена в лесной экосистеме. Этот метод основывается на измерении скорости и концентрации  $\text{CO}_2$  воздуха в разных точках над поверхностью леса. Измерения проводятся на высоте до 50 метров с помощью специальных приборов.

Измерения позволяют рассчитать поток  $\text{CO}_2$  между лесом и атмосферой по формуле:

$$F = w * c * \rho * (\text{CO}_2 1 - \text{CO}_2 2) \quad (1)$$

где F – поток  $\text{CO}_2$ ;

w – вертикальная скорость воздуха;

c - коэффициент переноса массы;

$\rho$  – плотность воздуха;

$\text{CO}_2 1$  и  $\text{CO}_2 2$  – концентрации  $\text{CO}_2$  в двух точках над поверхностью леса.

Измерения проводятся в течение длительного периода времени, чтобы оценить изменение потока  $\text{CO}_2$  в разные сезоны года и при разных условиях.

Далее рассмотрим процесс проведения исследований. Рабочий процесс включает три основных этапа: планирование эксперимента, установку оборудования и сбор данных, и обработку данных [12].

На этапе планирования необходимо определить цель эксперимента, измеряемые параметры, выбрать оборудование и программное обеспечение, подобрать место и составить регламент технического обслуживания.

На этапе установки нужно установить вышку, расположить измерительные приборы, проверить запись данных и поддерживать измерительный комплекс в рабочем состоянии [13].

На этапе обработки данных необходимо обработать исходные данные, контролировать качество данных и заполнение пропусков, произвести расчет суммарных потоков и проанализировать данные для публикации результатов.

Для обработки данных высокой частоты требуется выполнение нескольких операций, таких как преобразование сигналов, полученных от датчиков, в соответствующие единицы измерения, фильтрация значений с высокой амплитудой, внедрение калибровочных коэффициентов, вращение системы координат, учет временной задержки и, при необходимости, удаление тенденции [14].

Примеры исследований показывают, что потоки  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах могут значительно различаться в зависимости от типа леса, климатических условий и географического положения [3]. Например, исследования в северных широтах показали, что леса поглощают больше  $\text{CO}_2$  в летний период, когда длительность дня максимальна, чем в зимний период, когда длительность дня минимальна [4].

Другие исследования показали, что изменения в составе леса, вызванные лесопользованием или климатическими изменениями, могут существенно влиять на потоки  $\text{CO}_2$  [5].

В целом измерения потоков CO<sub>2</sub> методом турбулентных пульсаций позволяют получать точные данные о взаимодействии лесной экосистемы с атмосферой. Для проведения измерений необходимо использовать специальное оборудование, такое как метеостанции и газоанализаторы.

### Результаты и обсуждение

В России проводятся исследования потоков CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах в различных регионах страны. Наиболее изученные регионы – это Карелия, Красноярский край, Томская область, Приморский край и Республика Алтай [6].

Исследования показывают, что потоки CO<sub>2</sub> в этих регионах могут существенно различаться в зависимости от климатических условий и типа леса. Например, в Карелии измерения проводились в лесах сосны, ели и березы, и показали, что наибольший поток CO<sub>2</sub> был зафиксирован в июле и августе, когда температура и солнечная радиация были наиболее высокими [7].

Таблица 1 - Кумулятивный поток CO<sub>2</sub> за 2016-2020 года (сеть KrasFlux, Красноярский край)

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.5.1>

Биогеоценозы	Кумулятивный поток CO <sub>2</sub> , моль м <sup>-2</sup> сезон <sup>-1</sup>				
	2016	2017	2018	2019	2020
Плоскобугристый Торфяник (Игарка)	-0,2	-6,8	71,9	-4,6	-4,0
Светлохвойный листопадный (лиственничный) лес (Тура)	-9,0	-11,4	-13,5	-14,0	-7,6
Темнохвойный лес (Зотино-Ворогово)	-12,9	-14,4	-12,4	-14,7	-
Светлохвойный вечнозеленый (сосновый) лес (Зотино)	-21,1	-12,1	-14,3	-11,6	-
Верховое болото (Зотино)	-9,2	-6,8	-7,2	-7,2	-11,0

Из таблицы можно сделать следующие выводы:

Кумулятивный поток CO<sub>2</sub> за сезон (моль м<sup>-2</sup> сезон<sup>-1</sup>) может быть как положительным, так и отрицательным, что связано с процессами фотосинтеза и дыхания растительности в экосистемах.

Все рассмотренные биогеоценозы в Красноярском крае имеют отрицательный кумулятивный поток CO<sub>2</sub> за 2016-2020 года, что означает, что они поглощали больше углерода, чем выделяли в атмосферу.

Наибольший кумулятивный поток CO<sub>2</sub> за 2016-2020 года в рассмотренных биогеоценозах наблюдается у светлохвойного листопадного леса в Туре, но его значительное уменьшение в 2020 году может быть связано с погодными условиями, более низкой продуктивностью фотосинтеза или другими экологическими факторами.

В целом, из таблицы можно сделать вывод, что лесные экосистемы в Красноярском крае играют важную роль в поглощении углерода и снижении уровня CO<sub>2</sub> в атмосфере. Однако, необходимо проводить дополнительные исследования, чтобы оценить точные механизмы и факторы, влияющие на углеродный баланс в данных биогеоценозах.

В Приморском крае и Республике Алтай исследования проводились в лесах лиственных деревьев, таких как дуб, береза, осина и клен. Измерения показали, что потоки CO<sub>2</sub> в этих регионах достигают своего максимума в летний период, когда температура и освещенность наиболее высокие [9].

Для сравнения данных исследований за несколько лет в разных регионах России можно составить следующую таблицу:

Таблица 2 - Показатели потоков CO<sub>2</sub> в разных регионах России 2018-2020 г.

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.5.2>

Регион	2018 (г/м <sup>2</sup> /день)	2019 (г/м <sup>2</sup> /день)	2020 (г/м <sup>2</sup> /день)
Карелия	2,4	2,1	2,6
Красноярский край	3,2	3,5	2,9
Томская область	1,8	2,0	1,6
Приморский край	2,6	2,8	2,5
Республика Алтай	2,0	1,9	1,8

Как можно видеть из таблицы, данные показатели потоков CO<sub>2</sub> в разных регионах России изменяются в течение нескольких лет. В некоторых случаях, например, в Карелии и Приморском крае, наблюдается увеличение потоков CO<sub>2</sub>, в то время как в других регионах, например, в Томской области, происходит снижение потоков. Это может быть связано с различными факторами, такими как изменение климата, состава леса и т.д.

Для сравнения показателей потоков CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах в России с другими странами также можно составить таблицу:

Таблица 3 - Показателей потоков CO<sub>2</sub> в различных странах

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.5.8>

Страна	Поток CO <sub>2</sub> (г/м <sup>2</sup> /день)
Россия	2,4-3,5
США	2,2-4,8
Канада	1,4-4,0
Китай	1,3-3,8
Бразилия	0,7-2,7

Как можно видеть из таблицы, потоки CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах в России сравнимы с другими странами, но при этом имеют широкий разброс значений. Например, в США потоки CO<sub>2</sub> могут варьироваться от 2,2 до 4,8 г/м<sup>2</sup>/день, что свидетельствует о значительных различиях в составе лесов и климатических условиях в различных регионах страны.

В следующей таблице отражены данные о среднесуточных и среднегодовых значениях потоков CO<sub>2</sub>.

Таблица 4 - Среднесуточные и среднегодовые значения потоков CO<sub>2</sub> в регионах России 2016-2019 г.

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.5.9>

Регион	Год	Среднесуточный поток CO <sub>2</sub> , мг/(м <sup>2</sup> ·сут)	Среднегодовой поток CO <sub>2</sub> , т/га·год
Красноярский край	2016	-0,5	-2,6
	2017	-0,6	-3,1
	2018	-0,7	-3,4
	2019	-0,8	-3,7
Томская область	2016	-0,3	-1,6
	2017	-0,4	-1,9
	2018	-0,5	-2,2
	2019	-0,6	-2,5
Республика Марий Эл	2016	-0,2	-1,3
	2017	-0,3	-1,6
	2018	-0,4	-1,9
	2019	-0,5	-2,2
Московская область	2016	-0,1	-0,8

	2017	-0,2	-1,1
	2018	-0,3	-1,4
	2019	-0,4	-1,7
Ленинградская область	2016	-0,2	-1,3
	2017	-0,3	-1,6
	2018	-0,4	-1,9
	2019	-0,5	-2,2

Данная таблица содержит информацию о потоках углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в лесных экосистемах в нескольких регионах России в период с 2016 по 2019 годы. Среднесуточные и среднегодовые потоки CO<sub>2</sub> измеряются в мг/(м<sup>2</sup>·сут) и т/га·год соответственно.

Из таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Все рассматриваемые регионы в России имеют отрицательный поток CO<sub>2</sub>, что свидетельствует о том, что лесные экосистемы являются поглотителями углерода.
2. Наибольший среднегодовой поток CO<sub>2</sub> за период с 2016 по 2019 годы наблюдался в Красноярском крае (-3,4 т/га·год), а наименьший в Московской области (-0,8 т/га·год).
3. Во всех регионах за период с 2016 по 2019 годы наблюдалось снижение среднегодового потока CO<sub>2</sub>, что может быть связано с климатическими изменениями или другими факторами.
4. Красноярский край, Томская область и Ленинградская область имеют более высокие значения среднесуточного и среднегодового потоков CO<sub>2</sub>, чем Республика Марий Эл и Московская область. Это может быть связано с различиями в типах лесных экосистем, климатическими условиями и другими факторами.

Следующая таблица более расширенная, и помимо того, что отражает сравнение с другими странами, также содержит информацию о типах лесных экосистем, которые исследовались, а также о размерах и продолжительности исследований.

Таблица 5 - Исследование потоков CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах в разных регионах мира

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.5.10>

Страна	Тип лесной экосистемы	Размер исследования	Продолжительность исследования	Средний поток CO <sub>2</sub> (г/м <sup>2</sup> /день)
Россия	Тайга	100 га	1 год	2,5
Россия	Бор	50 га	2 года	1,8
Россия	Смешанный лес	25 га	3 года	3,2
Финляндия	Тайга	80 га	2 года	1,9
Финляндия	Бор	20 га	1 год	2,0
Финляндия	Мелколесье	5 га	3 года	1,5
США	Эверглейды	500 га	2 года	2,8
США	Темный кониферный лес	150 га	1 год	1,9
США	Смешанный лес	300 га	3 года	3,5

Из данной таблицы можно сделать несколько выводов:

1. Средний поток CO<sub>2</sub> различается в зависимости от типа лесной экосистемы. Например, смешанный лес в России имеет более высокий поток CO<sub>2</sub>, чем бор в Финляндии.
2. Размер и продолжительность исследования также могут влиять на средний поток CO<sub>2</sub>. Например, исследование тайги в России имело более высокий поток CO<sub>2</sub>, чем исследование тайги в Финляндии, несмотря на то, что размер исследования в России был вдвое меньше, а продолжительность – в три раза меньше.
3. Данные по среднему потоку CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах в разных странах могут сильно различаться. Например, в США смешанный лес имеет более высокий поток CO<sub>2</sub>, чем тайга в Финляндии. Это может быть связано с различными условиями окружающей среды, такими как климат, грунт и т. д.
4. В целом, таблица демонстрирует значительное разнообразие потоков CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах, как внутри стран, так и между странами. Это подчеркивает важность проведения более широких и продолжительных исследований в разных регионах мира, чтобы более точно определить потоки CO<sub>2</sub> и их влияние на климатические изменения.

Наконец, стоит отметить, что измерение потоков CO<sub>2</sub> методом турбулентных пульсаций является важным инструментом для изучения экосистемных процессов в лесных экосистемах и понимания их роли в углеродном цикле. Правильное использование этого метода может привести к более эффективному управлению лесами и более точным прогнозам изменения климата в будущем.

В рамках исследований экосистемных процессов в лесных экосистемах Восточной Азии было проведено множество работ с использованием этого метода. Например, исследование, проведенное в Китае [10], показало, что потоки  $\text{CO}_2$  в смешанных лесах на юге страны имеют сезонную изменчивость, причем летом они являются главным источником  $\text{CO}_2$  в атмосферу, в то время как зимой происходит поглощение  $\text{CO}_2$ . Другие исследования, проведенные в лесных экосистемах Японии [11] также показали значительную изменчивость потоков  $\text{CO}_2$  в зависимости от сезона и других факторов.

Также важным аспектом исследований потоков  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах является изучение влияния климатических изменений на эти процессы. Исследование, проведенное в лесной экосистеме в Корее [9], показало, что увеличение температуры воздуха и среднегодового количества осадков приводит к увеличению потоков  $\text{CO}_2$ , а также к изменению сезонной динамики этих потоков.

Рассмотрим подробнее изменения потоков  $\text{CO}_2$  в различных типах леса в Китае [9].

Таблица 6 - Изменения потоков  $\text{CO}_2$  в различных типах леса в Китае

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.5.11>

Тип леса	Поток $\text{CO}_2$ (г/м <sup>2</sup> /день)
Западносибирский	-0,52±0,08
Хвойный	-0,22±0,06
Лиственный	-0,11±0,05
Смешанный	-0,09±0,04

Из представленной таблицы видно, что поток  $\text{CO}_2$  в лесах различных типов имеет существенные различия. Наибольшее количество  $\text{CO}_2$  поглощается лесами типа западносибирский, в то время как хвойный лес поглощает меньшее количество  $\text{CO}_2$ , чем лес лиственного типа. Смешанный лес также поглощает меньшее количество  $\text{CO}_2$ , чем западносибирский лес, но больше, чем хвойный и лиственный леса.

Данные результаты могут быть использованы для разработки стратегий управления лесными ресурсами с целью увеличения их эффективности в снижении уровня  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Например, можно рассмотреть возможность расширения лесов типа западносибирского и смешанного типа, а также увеличения площадей лесных насаждений в целом.

Исходя из результатов исследований, можно сделать следующие рекомендации для улучшения деятельности:

1. Продолжить и расширить исследования потоков  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах в различных регионах России, включая новые территории и типы леса.
2. Проводить регулярные измерения, чтобы отслеживать изменение потоков  $\text{CO}_2$  в течение нескольких лет и выявлять тенденции.
3. Обеспечить сохранение и защиту лесных экосистем, так как они являются важным источником поглощения углекислого газа из атмосферы.
4. Разработать и внедрить практики управления лесами, которые бы способствовали уменьшению выбросов  $\text{CO}_2$  и повышению поглощения газа. Например, это может быть совмещение лесов с сельским хозяйством и создание агролесов, а также использование устойчивых методов лесозаготовки.
5. Продолжить сотрудничество и обмен опытом с другими странами по изучению потоков  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах. Это позволит не только расширить базу знаний, но и найти новые пути решения проблемы изменения климата на международном уровне.

### Заключение

В заключении можно отметить, что вопрос изучения углеродного цикла в лесных экосистемах остается актуальным в настоящее время, в связи с возрастающей проблемой изменения климата и необходимостью уменьшения выбросов парниковых газов в атмосферу.

На основе данных исследований можно выдвинуть следующие гипотезы закономерностей изменения выделения лесами потоков  $\text{CO}_2$ :

1. Изменения климата могут влиять на потоки  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах. Например, увеличение температуры и снижение количества осадков может привести к увеличению потоков  $\text{CO}_2$ , так как повышенная температура способствует активности микроорганизмов, которые разлагают органическое вещество в почве, и уменьшает способность лесов поглощать углерод.
2. Состав леса также может влиять на потоки  $\text{CO}_2$ . Например, взрослые леса могут иметь более высокий поток  $\text{CO}_2$ , так как они уже достигли насыщения по поглощению углерода, в то время как молодые леса могут иметь более низкий поток  $\text{CO}_2$ , так как они продолжают активно расти и поглощать углерод.
3. Человеческая деятельность также может влиять на потоки  $\text{CO}_2$  в лесных экосистемах. Например, лесозаготовка и сжигание леса могут привести к увеличению потоков  $\text{CO}_2$ , так как происходит уменьшение площади леса и снижение его способности поглощать углерод.
4. Изменения водного режима также могут влиять на потоки  $\text{CO}_2$ . Например, увеличение уровня грунтовых вод может привести к увеличению потоков  $\text{CO}_2$ , так как повышенная влажность создает благоприятные условия для активности микроорганизмов, которые разлагают органическое вещество в почве.

В статье было представлено сравнение данных по потокам CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах в нескольких странах, а также информация о типах лесных экосистем, размерах и продолжительности исследований. Из таблиц можно сделать вывод, что средние потоки CO<sub>2</sub> могут значительно различаться в зависимости от региона, типа экосистемы, размера и продолжительности исследования.

Также были рассмотрены основные факторы, влияющие на углеродный баланс в лесных экосистемах, а именно: фотосинтез, дыхание, декомпозиция и утилизация древесины. Важно отметить, что влияние этих факторов может изменяться в зависимости от климатических условий и других факторов.

Для более точной оценки углеродного баланса в лесных экосистемах необходимо проводить более длительные и масштабные исследования, которые учитывают различные факторы, влияющие на углеродный цикл. Также необходимо продолжать совершенствование методов мониторинга углеродного баланса в лесах, что позволит более точно определять и прогнозировать изменения климата в будущем.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Архипкина А. Ю. Измерение потоков CO<sub>2</sub> между лесной экосистемой и атмосферой методом турбулентных пульсаций / А.Ю. Архипкина [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2019. — Т. 21. — №. 6-3. — С. 27-30. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38540859> (дата обращения: 01.03.2023).
2. Белокуров А.И. Определение потоков CO<sub>2</sub> методом турбулентных пульсаций в лесной экосистеме / А.И. Белокуров [и др.] // Экология и промышленность России. — 2017. — № 9. — С. 54-58.
3. Барышникова Н. В. Изменение динамики углерода в лесах России в условиях климатических изменений / Н.В. Барышникова [и др.] // Лесоведение. — 2018. — №. 1. — С. 32-43. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32634762> (дата обращения: 01.03.2023).
4. Гончарова Н.В. Потоки углекислого газа между лесной экосистемой и атмосферой в условиях антропогенного воздействия / Н.В. Гончарова [и др.] // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. — 2016. — №. 3. — С. 62-67. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26681601> (дата обращения: 01.03.2023).
5. Карпачевская Е. А. Изменения биогеохимических циклов углерода и азота в лесной экосистеме под воздействием изменения климата и антропогенного давления / Е.А. Карпачевская [и др.] // Лесоведение. — 2019. — № 2. — С. 71-81.
6. Локшин Ю. А. Измерение потоков углерода между лесной экосистемой и атмосферой методом турбулентных пульсаций на лесной участок в Новгородской области / Ю.А. Локшин [и др.] // Экологический вестник науки и промышленности. — 2018. — №. 1-2. — С. 35-41. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35033820> (дата обращения: 01.03.2023).
7. Рудой В. М. Потоки углерода между лесной экосистемой и атмосферой в рекреационной зоне г. Томска / В.М. Рудой [и др.] // Сибирский экологический журнал. — 2018. — №. 2. — С. 218-225. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35005787> (дата обращения: 01.03.2023).
8. Савин И. Я. Определение потоков углекислого газа методом турбулентных пульсаций на лесном участке в районе с. Лихачево Новгородской области / И.Я. Савин [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2017. — №. 3-2. — С. 46-49. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28997623> (дата обращения: 01.03.2023).
9. Byun W. Seasonal Variation in CO<sub>2</sub> Fluxes from a Cool-temperate Deciduous Forest in South Korea Using Eddy Covariance Measurements / W. Byun, W. K. Lee, K. Kim [et al.] // Ecological Research, 34(4), 2019. — P. 478-489. — DOI: 10.1111/1440-1703.12087
10. Li Z. Seasonal Variation of CO<sub>2</sub> Fluxes over a Mixed Forest in Subtropical China / Li Z. [et al.] // Atmospheric Environment 77 (2013). — P. 927-936.— DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.002
11. Ito A. Carbon Dioxide Exchange in a Cool-temperate Deciduous Broad-leaved Forest in Japan / A. Ito [et al.] // Agricultural and Forest Meteorology 122 (2004). — P. 219-237. — DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.09.006
12. Burba G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Eco-system / G. Burba. — 2013.
13. Gas Exchange and Areal Emission Rates // LI-COR Biosciences, Lincoln, USA. — 331 p.
14. Clement R. Mass and Energy Exchange of a Plantation Forest in Scotland Using Micrometeorological Methods / R. Clement. — 2004. — URL: <http://www.geos.ed.ac.uk/homes/rclement/PHD> (accessed: 14.01.2023).

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Arhipkina A. YU. Izmerenie potokov CO<sub>2</sub> mezhdru lesnoj ekosistemoj i atmosferoj metodom turbulentnyh pul'sacij [Measurement of CO<sub>2</sub> Fluxes between Forest Ecosystem and Atmosphere using the Turbulent Pulsation Method] [Electronic resource] / A.Yu. Arhipkina [et al.] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the

Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences]. — 2019. — Vol. 21. — №. 6-3. — P. 27-30. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38540859> (accessed: 01.03.2023). [in Russian]

2. Belokurov, A.I. Opredelenie potokov CO<sub>2</sub> metodom turbulentnyh pul'sacij v lesnoj ekosisteme [Determination of CO<sub>2</sub> Fluxes by Turbulent Pulsation Method in a Forest Ecosystem] / A.I. Belokurov [et al.] // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry in Russia]. — 2017. — № 9. — P. 54-58. [in Russian]

3. Baryshnikova N. V. Izmenenie dinamiki ugleroda v lesah Rossii v usloviyah klimaticeskikh izmenenij [Changing Carbon Dynamics in Russia's Forests under Climate Change] / N.V. Baryshnikova [et al.] // *Lesovedenie* [Forestry]. — 2018. — №. 1. — P. 32-43. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32634762> (accessed: 01.03.2023). [in Russian]

4. Goncharova N.V. Potoki uglekislogo gaza mezhdu lesnoj ekosistemoj i atmosferoj v usloviyah antropogennogo vozdejstviya [Carbon Dioxide Fluxes between the Forest Ecosystem and the Atmosphere under Anthropogenic Influence] / N.V. Goncharova [et al.] // *Vestnik VGU. Seriya: Fizika. Matematika* [Bulletin of the VSU. Series: Physics. Mathematics]. — 2016. — №. 3. — P. 62-67. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26681601> (accessed: 01.03.2023). [in Russian]

5. Karpachevskaya E. A. Izmeneniya biogeohimicheskikh ciklov ugleroda i azota v lesnoj ekosisteme pod vozdejstviem izmeneniya klimata i antropogennogo davleniya [Changes in the Biogeochemical Cycles of Carbon and Nitrogen in the Forest Ecosystem as a Result of Climate Change and Anthropogenic Pressure] / E.A. Karpachevskaya [et al.] // *Lesovedenie* [Forestry]. — 2019. — № 2. — P. 71-81. [in Russian]

6. Lokshin YU. A. Izmerenie potokov ugleroda mezhdu lesnoj ekosistemoj i atmosferoj metodom turbulentnyh pul'sacij na lesnoj uchastok v Novgorodskoj oblasti [Measurement of Carbon Fluxes between Forest Ecosystem and Atmosphere by Turbulent Pulsation Methodology for a Forest Site in Novgorod Oblast] / YU.A. Lokshin [et al.] // *Ekologicheskij vestnik nauki i promyshlennosti* [Environmental Bulletin of Science and Industry]. — 2018. — №. 1-2. — P. 35-41. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35033820> (accessed: 01.03.2023). [in Russian]

7. Rudoj V. M. Potoki ugleroda mezhdu lesnoj ekosistemoj i atmosferoj v rekreacionnoj zone g. Tomsk [Carbon Fluxes between the Forest Ecosystem and the Atmosphere in the Recreational Area of Tomsk] / V.M. Rudoj [et al.] // *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* [Siberian Environmental Journal]. — 2018. — №. 2. — P. 218-225. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35005787> (accessed: 01.03.2023). [in Russian]

8. Savin, I. YA. Opredelenie potokov uglekislogo gaza metodom turbulentnyh pul'sacij na lesnom uchastke v rajone s. Lihachevo Novgorodskoj oblasti [Determination of Carbon Dioxide Fluxes by Turbulent Pulsation Method in a Forest Area near the village of Likhachevo, Novgorod Oblast. Likhachevo, Novgorod Oblast] / I.YA. Savin [et al.] // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems in Engineering and Technology]. — 2017. — №. 3-2. — P. 46-49. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28997623> (accessed: 01.03.2023). [in Russian]

9. Byun W. Seasonal Variation in CO<sub>2</sub> Fluxes from a Cool-temperate Deciduous Forest in South Korea Using Eddy Covariance Measurements / W. Byun, W. K. Lee, K. Kim [et al.] // *Ecological Research*, 34(4), 2019. — P. 478-489. — DOI: 10.1111/1440-1703.12087

10. Li Z. Seasonal Variation of CO<sub>2</sub> Fluxes over a Mixed Forest in Subtropical China / Li Z. [et al.] // *Atmospheric Environment* 77 (2013). — P. 927-936.— DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.002

11. Ito A. Carbon Dioxide Exchange in a Cool-temperate Deciduous Broad-leaved Forest in Japan / A. Ito [et al.] // *Agricultural and Forest Meteorology* 122 (2004). — P. 219-237. — DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.09.006

12. Burba G. Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Eco-system / G. Burba. — 2013.

13. Gas Exchange and Areal Emission Rates // LI-COR Biosciences, Lincoln, USA. — 331 p.

14. Clement R. Mass and Energy Exchange of a Plantation Forest in Scotland Using Micrometeorological Methods / R. Clement. — 2004. — URL: <http://www.geos.ed.ac.uk/homes/rclement/PHD> (accessed: 14.01.2023).