

УДК 551.586

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА,
ЯВНОГО И СКРЫТОГО ТЕПЛА В ЛЕСНЫХ И БОЛОТНЫХ
ЭКОСИСТЕМАХ СЕВЕРНОЙ СИБИРИ

Е. М. ГОРБАРЕНКО ^{1,2*}, В. И. ЗЫРЯНОВ ^{3**}, А. В. ГОРБАРЕНКО ^{4***},
А. С. ПРОКУШКИН ^{2,3****}, А. В. ПАНОВ ^{3*****}, А. В. ОЛЬЧЕВ ^{1,2*****}

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Институт леса им. В. Н. Сукачева,

Сибирское отделение РАН, Красноярск, Россия

⁴ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Изменения климата в высоких широтах происходят более быстрыми темпами по сравнению с другими регионами. Полярные экосистемы особенно уязвимы и подвержены подобным изменениям. Реакция растительности на изменения условий внешней среды в первую очередь проявляется через изменение функционирования экосистем, что в свою очередь влияет на потоки водяного пара (H_2O) и углекислого газа (CO_2). Основной целью исследования был анализ сезонной изменчивости нетто экосистемного обмена CO_2 (NEE), а также потоков явного (H) и скрытого тепла (LE) в субарктическом болотном массиве и северотаежном лиственничном лесу северной Сибири. Новые экспериментальные данные были получены с использованием метода турбулентных пульсаций с 2019 по 2023 гг. Результаты показали, что обе экосистемы устойчиво поглощали CO_2 из атмосферы, несмотря на значительные межгодовые колебания метеорологических условий. NEE в течение вегетационного периода варьировался от $-62,9$ до $-20,2 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$ в субарктическом болоте и от $-63,5$ до $-83,6 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$ в лиственничном лесу в период 2019–2023 гг. Потоки H и LE также показали значительные межгодовые вариации, в основном определяемые приходящей солнечной радиацией и колебаниями количества осадков.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.251>

Keywords: carbon dioxide fluxes, latent and sensible heat fluxes, eddy covariance, subarctic palsa mire, larch forest, North Siberia, forest-tundra ecosystem, permafrost.

Введение. Современное глобальное потепление наиболее выражено в полярных широтах, где темпы повышения температуры более чем в два раза

* E-mail: lisan.sat@gmail.com

** E-mail: zyryanov.vi@ya.ru

*** E-mail: aar44i@yandex.ru

**** E-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

***** E-mail: alexey.v.panov@gmail.com

***** E-mail: aoltche@gmail.com

превышают общемировой тренд [1, 2]. Это явление, известное как полярное усиление, приводит к тому, что данные регионы нагреваются примерно в два раза быстрее среднемирового показателя. В то время как средняя глобальная температура поверхности повысилась примерно на $1,3^{\circ}\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным периодом, арктические регионы потеплели на $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ за тот же отрезок времени [3]. Современная скорость потепления в Арктике по различным оценкам составляет около $0,75^{\circ}\text{C}$ за десятилетие по сравнению с средним глобальным показателем $0,18^{\circ}\text{C}$ [4]. Это ускоренное потепление в полярных регионах объясняется рядом механизмов обратной связи, включая снижение альбедо из-за таяния морского льда и снежного покрова, что приводит к повышенному поглощению приходящей солнечной радиации [5]. Быстрое потепление в этих регионах может иметь далеко идущие последствия для местных экосистем и глобальных климатических моделей [6, 7].

Одним из наиболее уязвимых регионов, подверженных глобальному потеплению, является регион Сибири в Северной Евразии, где обширные бореальные леса и водно-болотные угодья играют решающую роль в глобальном углеродном цикле и регулировании климата [8, 9]. Данные экосистемы характеризуются высоким биоразнообразием и могут служить как значительными поглотителями углерода, так и источниками углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4), влияя на концентрации парниковых газов в атмосфере и воздействуя на глобальный и региональный энергетический и углеродный балансы [10, 11]. Ускоренное потепление в высоких широтах непосредственно влияет на эти уязвимые экосистемы, потенциально изменяя их способность к накоплению углерода и энергообмен с атмосферой.

Недавние исследования подчеркнули сложность и изменчивость потоков парниковых газов в полярных экосистемах и необходимость долгосрочных наблюдений за ними для фиксации межгодовых вариаций и реакций на экстремальные погодные события [12–14]. Эта сложность особенно очевидна в северо-центральной Сибири, где реакция экосистем на изменение климата находится под влиянием вечной мерзлоты, изменяющихся характеристик растительности и гидрологических условий [14]. В целом, большинство недавних исследований подчеркивают высокое разнообразие потоков CO_2 , явного (H) и скрытого тепла (LE) в сибирских экосистемах и необходимость продолжения долгосрочных наблюдений для лучшего понимания и прогнозирования их реакции на климатические изменения. Понимание временной и сезонной изменчивости потоков CO_2 , H и LE в этих экосистемах необходимо для точного прогнозирования их реакции на изменение климата и потенциальных механизмов обратной связи [15].

Основная цель исследования – проанализировать и сравнить долгосрочную сезонную изменчивость потоков нетто экосистемного обмена CO_2 (NEE), H и LE в субарктическом болотном массиве и северотаежном лиственничном лесу северной Сибири.

Материалы и методы исследования. Для анализа было выбрано два экспериментальных участка: субарктический болотный массив рядом с городом Игарка (станция “Игарка”), и 120-летний северотаежный лиственничный лес рядом с поселком Тура (станция “Тура”) (рис. 1).

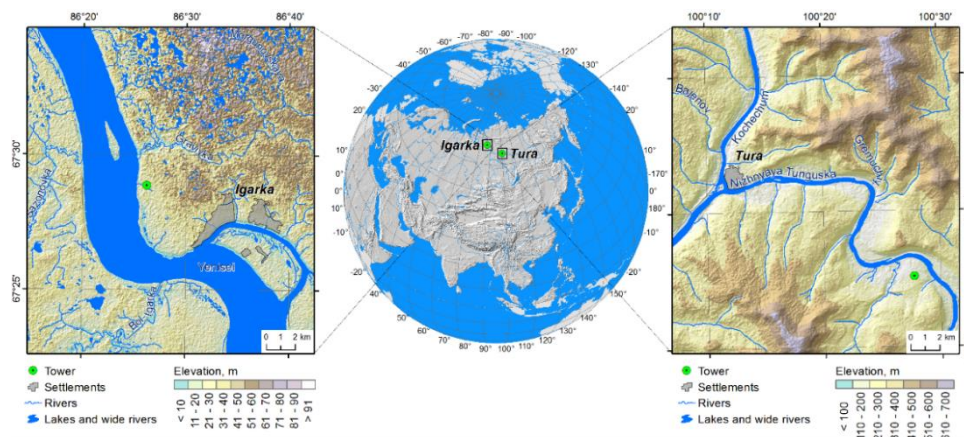


Рис. 1. Местоположение объектов исследования станций “Игарка” и “Тура”.

Болотный массив со станцией “Игарка” расположен в экотоне северной тайги и лесотундры в Туруханском районе Красноярского края России (67°28'56" с.ш., 86°25'26" в.д.). Площадь болотного массива составляет около 21,7 га, он располагается в водоразделе ручья Малая Гравийка, примерно в 10 км к северу от г. Игарка. Болото занимает первую пойменную террасу по правому берегу долины р. Енисей на высоте от 20 до 38 м над у. м. Район располагается в зоне сплошной вечной мерзлоты и характеризуется субарктическим климатом (Dfc по классификации климатов Кеппена [16]) с продолжительной, очень холодной зимой и коротким, относительно прохладным летом.

Северотаежный лиственничный лес со станцией “Тура” располагается на пологой поверхности древней речной террасы р. Нижняя Тунгуска (приток Енисея) в Эвенкийском районе Красноярского края России (64°12'36" с.ш., 100°27'15" в.д.). Экспериментальный участок расположен на высоте 250 м над у. м. и имеет чрезвычайно холодный субарктический континентальный климат (Dfd по классификации климатов Кеппена). Несмотря на относительно небольшое количество осадков, низкие температуры способствуют формированию избыточных условий увлажнения в этом районе [14].

Потоки CO₂, H и LE на обоих экспериментальных участках измерялись методом турбулентных пульсаций [17]. На станции “Игарка” установлена мачта высотой 6 м в центральной части болотного массива. Вышка на станции “Тура” имеет высоту 18 м и также расположена в центре лесного массива. Оборудование для измерения потоков установлено в верхних частях обеих вышек. Измерительное оборудование на станциях включает приборы для высокочастотных измерений компонент скорости ветра, температуры воздуха, концентраций H₂O и CO₂, а также метеорологические приборы для измерения суммарной, проходящей и отраженной солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, осадков, потоков тепла в почве и др. (табл. 1).

Дальнейшая обработка данных проводилась согласно общепринятым рекомендациям [17, 18]. Потоки CO₂, H и LE рассчитывались из сырых данных с 30-минутными временными интервалами с использованием программного пакета EddyPro (LI-COR Lincoln, NE, USA), выполняющем все необходимые

статистические тесты и коррекции (удаление выбросов, поворот системы координат, коррекция временных задержек, удаление тренда, коррекция частотного отклика и плотности воздуха и т.д.). После обработки данных все потоки, содержащие выбросы, связанные с осадками, а также во время слабой турбулентности, были исключены из анализа данных. Пороговые значения динамической скорости, рассчитанные для всего периода измерений на экспериментальных участках, составили $0,12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ для “Игарки” и $0,17 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ для “Туры”. Отношение Боуэна ($\beta = H/LE$) [19] использовалось для оценки распределения радиационного баланса между потоками H и LE.

Таблица 1

Измерительное оборудование, установленное на станциях “Игарка” и “Тура”

Оборудование	Тура	Игарка
<i>Оборудование для измерения потоков CO₂, H и LE</i>		
Ультразвуковой 3D анемометр	R3-50, Gill Instruments, Great Britain	USA-1, Metek, Germany
CO ₂ и H ₂ O газоанализатор	LI-7500, LI-COR, USA	LI-7200A, LI-COR, USA
Прибор для сбора данных (даталоггер)	CR-3000, Campbell Scientific, USA	LI-7550, LI-COR, USA
<i>Метеорологические приборы</i>		
Датчик для измерения температуры и влажности воздуха	HM45A, Vaisala, Finland	HMP155, Vaisala, Finland
Осадкомер	52202, RM Young, USA	TR-525M, Texas Electronics, USA
Четырехкомпонентный радиометр	CNR1, Kipp & Zonen, Netherlands	CNR4, Kipp & Zonen, Netherlands
Датчик фотосинтетически-активной радиации	LI-190SA, LI-COR, USA	LI-190SA, LI-COR, USA
Почвенный термометр	CPT, Climatec, Japan	Stevens Hydra Probe II, LI-COR, USA
Датчик для измерения влажности почвы	CS-616, Campbell Scientific, USA	Stevens Hydra Probe II, LI-COR, USA
Датчик для измерения потока тепла в почву	HF-01, REBS, Delft, Netherlands	HFP01SC, Hukseflux, The Netherlands
Прибор для сбора данных (даталоггер)	CR-10X, Campbell Scientific, USA	LI-7550, LI-COR, USA

Поскольку обе исследуемые станции расположены севернее 60° широты, заполнение пропусков в рядах данных о потоках с помощью стандартного программного пакета ReddyProc [20] приводит к систематическому смещению в оценках суточных потоков в северных широтах согласно [21]. Во избежание неопределенностей во временных рядах потоков, пропуски в данных были заполнены с использованием методов машинного обучения, на основе градиентного бустинга [21]. Также для более детальной оценки влияния внешних параметров на NEE он разделялся на 2 компоненты: валовую первичную продукцию (GPP) и экосистемное дыхание (TER). Разделение проводилось с помощью стандартного программного пакета RedyProc [20].

Полевые измерения проводились в период с поздней весны (начало мая) до осени (начало октября) с 2016 г. Для анализа были выбраны периоды с апреля по сентябрь 2019–2023 гг. (кроме 2021 г. на станции “Игарка” и 2022 г. на станции “Тура”). Эти периоды были выбраны из-за минимального количества пробелов в рядах измерений (табл. 2).

Таблица 2

Периоды измерений для каждого года (2019–2023 гг.) для станций “Тура” и “Игарка”

Станция	Год	2019	2020	2021	2022	2023
Игарка	период наблюдений	8.05–13.10	24.05–6.10	нет измерений	29.04–7.10	14.05–22.09
Тура	период наблюдений	18.04–9.09	11.06–22.09	15.04–6.09	нет измерений	21.04–26.09

Результаты исследований и их обсуждение. Погодные условия в течение периода наблюдений на обоих экспериментальных участках значительно варьировались от года к году, но в целом были близки к средним климатическим значениям. С началом вегетационного периода и увеличением приходящей солнечной радиации среднесуточные температуры постепенно повышались, достигая максимума в конце июня (когда продолжительность светового дня была максимальной). Затем, ближе к осени, наблюдалась противоположная тенденция – снижение среднесуточных значений температуры воздуха.

На станции “Игарка” среднесуточные значения температуры в летний период (с июня по август) варьировались от 1 до 26°C в 2019 г., от 6 до 25°C в 2020 г., от 2 до 25°C в 2022 г. и от 6 до 25°C в 2023 г. (рис. 2, а). Временная изменчивость осадков в периоды измерений была достаточно неоднородной (рис. 2, а). Максимальное количество осадков на станции “Игарка” было зарегистрировано в 2023 г. и составило 244,5 мм с июня по август, а минимальное – в 2019 г., 22,9 мм. Среднесуточная температура в течение вегетационного периода на станции “Тура” варьировала от 8°C до 26°C в июне, затем постепенно снижалась до 10°C в сентябре 2019 г. (рис. 3, а). В последующие годы среднесуточная температура в летние месяцы варьировала от 9 до 24°C в 2020 г., от 6 до 24°C в 2021 г. и от 5 до 23°C в 2023 г. (рис. 3, а). Максимальное количество осадков за летний период на станции “Тура” также наблюдалось в 2023 г. (208,5 мм), в то время как минимальное было зарегистрировано в 2019 г. (45 мм).

Максимальные значения радиационного баланса на станциях измерений потоков наблюдались ежегодно с середины июня до середины июля и варьировались в среднем от 7 до 17 МДж·м⁻²·сут.⁻¹ на станции “Игарка” (рис. 2, б) и от 5 до 14 МДж·м⁻²·сут.⁻¹ на станции “Тура” (рис. 3, б). В дальнейшем количество приходящей солнечной радиации уменьшалось с сокращением светового дня, что приводило к снижению радиационного баланса до 0–6 МДж·м⁻²·сут.⁻¹ на станции “Игарка” и 0–4 МДж·м⁻²·сут.⁻¹ на станции “Тура”. Максимальные значения радиационного баланса на лесном участке “Тура” в летние месяцы наблюдались в 2023 г. (15 МДж·м⁻²),

а минимальные – в 2021 г. ($14,5 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$). Максимальный радиационный баланс на болотном массиве в летние месяцы был несколько выше, чем на лесном участке, достигая $17,5 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ в 2022 г. Минимальный радиационный баланс наблюдался в 2023 г. ($16,0 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$).

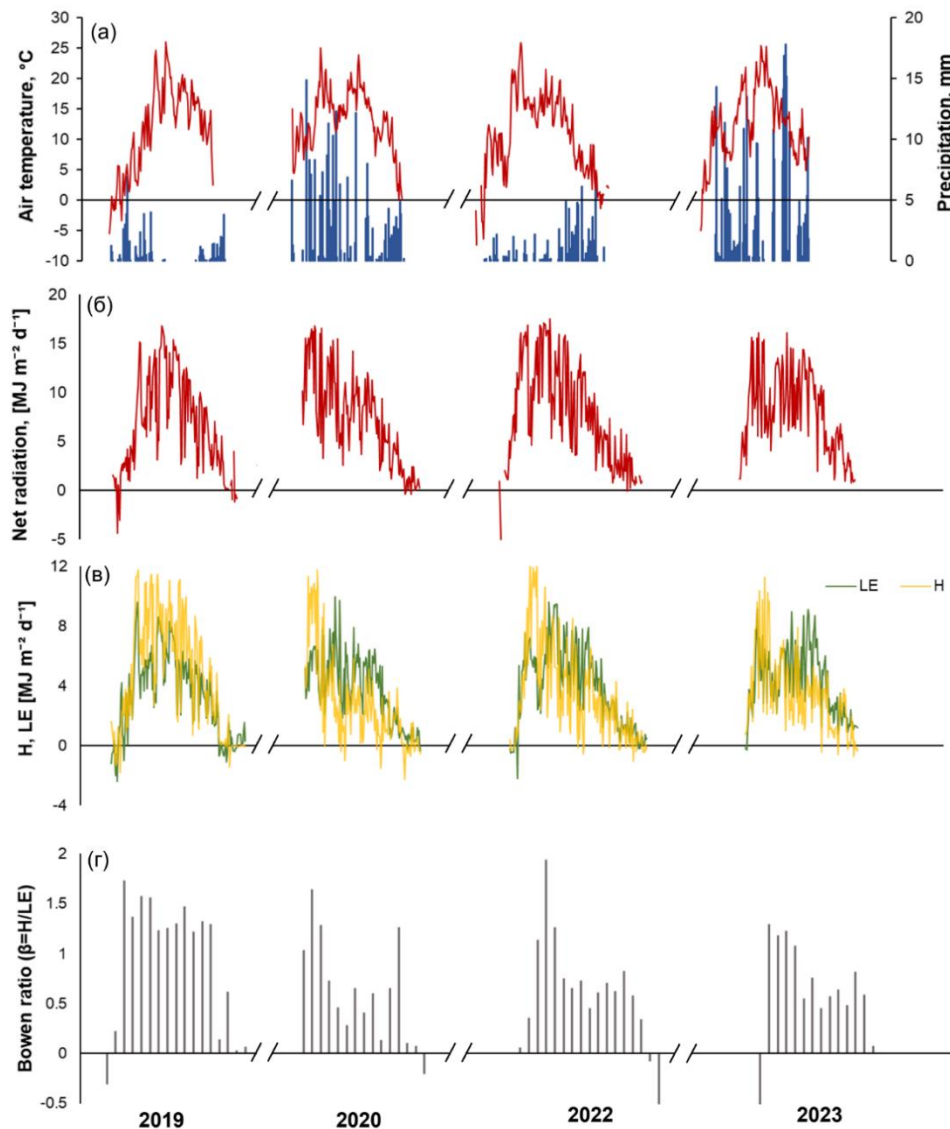


Рис. 2. Сезонная изменчивость среднесуточных температур и суточных сумм осадков (а), среднесуточных значений радиационного баланса (б), среднесуточных потоков Н и LE (в) и средних за 10 дней значений отношения Боуэна (г) на станции “Игарка” с 2019 по 2023 гг. (кроме 2021 г.).

Сезонная изменчивость потоков Н и LE в течение исследуемого периода также была относительно высокой на обоих экспериментальных участках (рис. 2 и 3, в), на что влияли как абиотические, так и биотические факторы.

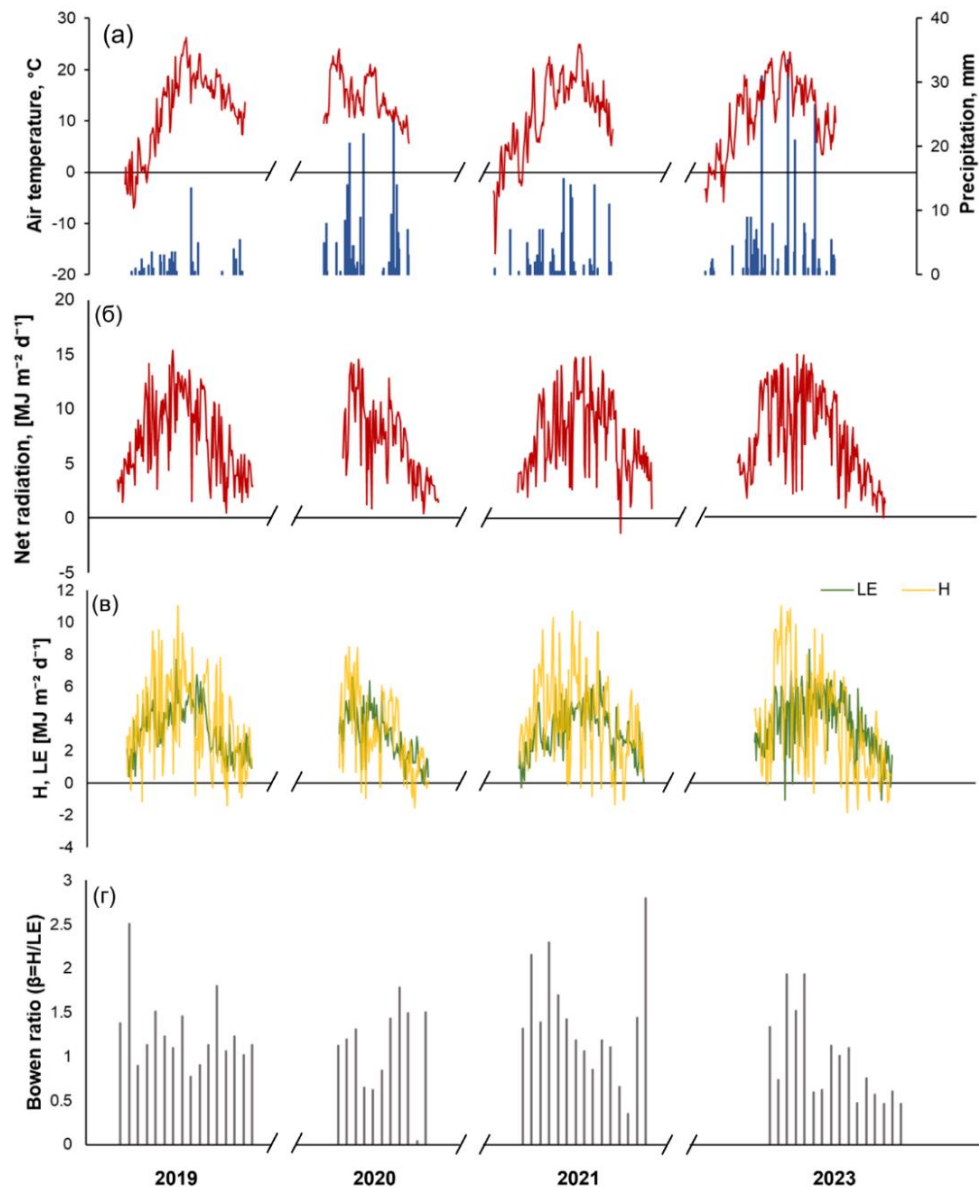


Рис. 3. Сезонная изменчивость среднесуточных температур и суточных сумм осадков (а), среднесуточных значений радиационного баланса (б), среднесуточных потоков Н и LE (в) и средних за 10 дней значений отношения Боуэна (г) на станции “Тура” с 2019 по 2023 гг. (кроме 2022 г.).

В 2019 г. на станции “Игарка” Н превышал LE в среднем на $2\text{--}4 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$ из-за дефицита осадков в период наблюдений, достигая $11,7 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$ в середине июня (рис. 2, в) (за исключением весеннего периода после обильного снеготаяния). Отношение Боуэна варьировало от 1,5 до 2,5 (рис. 2, г). Аналогичное распределение потоков наблюдалось на станции “Тура” в 2019 г.: Н достигал значений $11 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$,

LE составлял $8,2 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$, а отношение Боуэна в лиственничном лесу варьировало от 0,8 до 2,5 (рис. 3, в, г). В 2020 г. из-за обильных осадков и высокого влагосодержания в верхнем почвенном горизонте болота испарение увеличилось и LE достиг $9,9 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$, превышая Н в среднем на $2\text{--}4 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$ (рис. 2, в). Отношение Боуэна на станции “Игарка” варьировало от 0,1 до 0,6 (рис. 2, г). В лиственничном лесу в 2020 г. после периодов сильных и продолжительных осадков наблюдалось повышенное испарение и превышение LE над Н в течение нескольких недель. Отношение Боуэна варьировало от 0,7 до 1,8 (рис. 3, г).

Потоки в 2021 г. на станции “Тура” были схожи с 2019 г.: Н превышал LE на $2\text{--}6 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$, достигая $10,6 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$. На станции “Игарка” были зарегистрированы самые высокие значения Н за весь период наблюдений в 2022 г., достигающие $12,1 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$, из-за дефицита осадков в начале вегетационного периода и снижения LE. Ко второй половине вегетационного периода LE начал увеличиваться и превысил Н благодаря увеличению осадков, что обеспечило достаточные условия увлажнения почвы и высокие темпы транспирации древесной и травянистой растительности. В 2023 г. потоки Н и LE на обоих экспериментальных участках показали схожую динамику: в начале вегетационного периода Н превышал LE, но позже, из-за увеличения осадков и постепенного снижения среднесуточных температур, LE сильно увеличился при снижении Н (рис. 2 и 3, в). В течение сезона отношение Боуэна варьировало от 1,3 до 0,1 на станции “Игарка” и от 2,0 до 0,4 на станции “Тура” (рис. 2 и 3, г).

Сравнение интегральных потоков Н и LE, рассчитанных за весь летний период (с июня по август) показало, что наибольшие значения Н наблюдались в 2019 г. как на болотном массиве, так и в лиственничном лесу, составляя $637 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ и $379 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ соответственно, из-за дефицита осадков при довольно высоких летних температурах. Самые низкие значения Н были зарегистрированы в 2020 г. в обеих экосистемах. На станции “Игарка” интегральные летние потоки LE показали незначительные различия между годами из-за высокого содержания воды в верхнем горизонте почвы в течение всего периода наблюдений с 2019 по 2023 гг. На станции “Тура” наблюдался противоположный эффект: максимальный интегральный поток LE наблюдался в год с максимальным количеством осадков.

Сезонная динамика чистого экосистемного обмена CO_2 и его компонентов характеризовалась высокой изменчивостью в основном из-за изменений метеорологических параметров: приходящей солнечной радиации, температуры воздуха, количества осадков и влажности почвы, а также изменений фенологических параметров и функциональной активности растительных сообществ. Результаты измерений показали, что обе изучаемые экосистемы являлись поглотителями CO_2 из атмосферы в течение вегетационных периодов с 2019 по 2023 гг. (рис. 4 и 5, а). Как на болотном массиве, так и в лиственничном лесу средние суточные значения валовой первичной продукции (GPP) значительно превышали экосистемное дыхание (TER) с середины июня до конца августа (рис. 4 и 5, б).

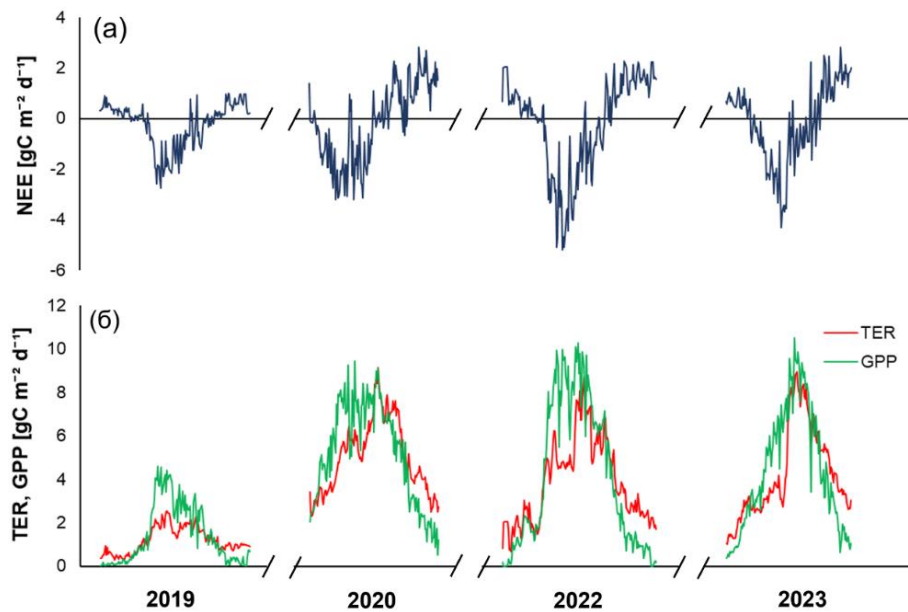


Рис. 4. Сезонная изменчивость NEE (а), TER и GPP (б) на станции “Игарка” с 2019 по 2023 гг. (кроме 2021 г.).

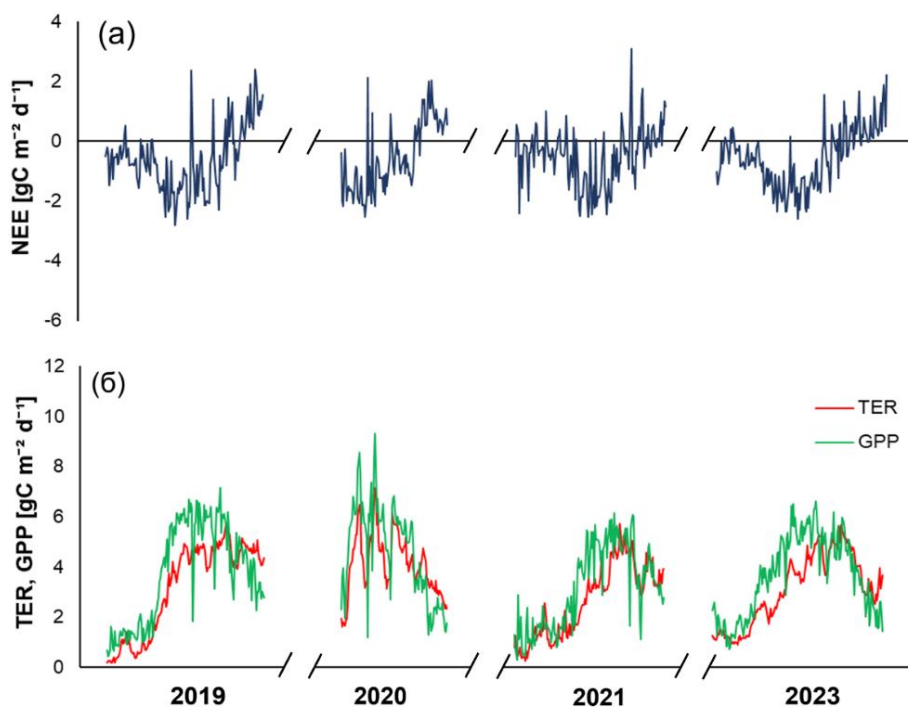


Рис. 5. Сезонная изменчивость NEE (а), TER и GPP (б) на станции “Тура” с 2019 по 2023 гг. (кроме 2022 г.).

В конце весны с 2019 по 2023 гг. на станции “Игарка” наблюдалась слабая эмиссия CO_2 в атмосферу (около $0,1\text{--}1,0 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{сут.}^{-1}$) и TER превышало

GPP. По мере увеличения количества зеленой биомассы растений из-за увеличения температуры и суммарной солнечной радиации, NEE становилось устойчиво отрицательным в конце весны–начале лета. На болоте в “Игарке” этот переход наблюдался в середине июня, тогда как на станции “Тура” он происходил значительно раньше (начало измерений потоков из-за ограниченной доступности экспериментального участка часто совпадало с началом активной фотосинтетической деятельности лиственных и травяного покрова). Максимальная среднесуточная скорость поглощения на станции “Игарка” наблюдалась в 2022 г. и составила $-5,2 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$, в то время как на станции “Тура” в 2019 г. она составила $-2,7 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$ (рис. 4 и 5, а). GPP в эти периоды варьировало от 4,1 до 9,8 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$ на станции “Игарка” и от 6,5 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$ до 95 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$ на станции “Тура” в разные годы с 2019 по 2023 гг. С конца июля по август разница между поглощением и эмиссией CO_2 постепенно уменьшалась в обеих экосистемах и была близка к нулю в начале сентября. К середине сентября значения NEE были положительными, указывая на преобладающую эмиссию CO_2 в атмосферу: в среднем 1,0–2,5 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$ на станции “Игарка” и 0,5–2,2 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут.}^{-1}$ на станции “Тура”.

Для сравнения межгодовой изменчивости потоков CO_2 в обеих экосистемах были проанализированы интегральные значения потоков NEE, TER и GPP, посчитанные за весь летний период (с июня по август) (табл. 3). NEE в течение вегетационного периода с 2019 по 2023 гг. варьировал от $-62,9 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$ до $-120,2 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$ на бугристом болоте и от $-63,5 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$ до $-83,6 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$ в лиственном лесу (табл. 3). Максимальное поглощение CO_2 за три летних месяца наблюдалось на станции “Игарка” в 2022 г. ($-120,62 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$), на станции “Тура” – в 2023 г. ($-83,61 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$). Минимальное поглощение CO_2 на станции “Игарка” было зарегистрировано в 2019 г. ($-62,93 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$), на станции “Тура” – в 2021 г. ($-63,55 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2}$). Эти годы также характеризуются минимальными значениями GPP и TER в обеих экосистемах. Более сильная межгодовая изменчивость NEE наблюдалась на болотном массиве. Это может быть связано с более высокой чувствительностью данной экосистемы к условиям окружающей среды в течение вегетационного периода.

Таблица 3

Интегральные значения (за период 1.06–31.08) NEE, TER и GPP на станциях “Игарка” и “Тура” с 2019 по 2023 гг.

Станция	Год	2019	2020	2021	2022	2023
Игарка	NEE ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$)	-62,93	-74,34	нет измерений	-120,62	-67,99
	TER ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$)	135,51	526,94		464,22	453,57
	GPP ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$)	198,44	601,29		584,84	521,57
Тура	NEE ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$)	-77,01	-71,01	-63,55	нет измерений	-83,61
	TER ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$)	389,19	361,39	315,5		356,43
	GPP ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$)	466,2	432,4	379,05		440,05

Заклучение. Проведенное исследование временной изменчивости потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла в лесных и болотных

биомах Северной Сибири в период 2019–2023 гг. позволило получить ряд важных результатов, характеризующих функционирование данных экосистем.

Метеорологические условия в течение периода наблюдений демонстрировали значительную межгодовую изменчивость при сохранении общих климатических закономерностей. Температурный режим характеризовался типичной для региона сезонной динамикой с максимумом в конце июня, когда среднесуточные температуры достигали 25–26°C на обеих станциях. Количество осадков варьировало в широких пределах: от 22,9 мм (“Игарка”, 2019) до 244,5 мм (“Игарка”, 2023) за летний период, что оказывало определяющее влияние на энергетический и углеродный обмен экосистем.

Радиационный баланс достигал максимальных значений в период с середины июня до середины июля, составляя 7–17 МДж·м⁻²·сут.⁻¹ на болотной станции “Игарка” и 5–14 МДж·м⁻²·сут.⁻¹ на лесной станции “Тура”. Примечательно, что болотная экосистема характеризовалась несколько более высокими значениями радиационного баланса по сравнению с лесной, что может быть связано с различиями в альбедо поверхности и структурой растительного покрова.

Анализ потоков Н и LE выявил их устойчивую зависимость от метеорологических условий. В засушливые годы (2019, 2021, начало 2022 гг.) наблюдалось преобладание потоков Н над LE, с отношением Боуэна, достигающим 2,5. В условиях достаточного увлажнения (2020, 2023 гг.) доминировали потоки скрытого тепла, а отношение Боуэна снижалось до 0,1–0,6. Полученные результаты согласуются с данными других исследований, показывающих критическую роль влагообеспеченности в формировании энергетического баланса экосистем [22, 23]. Максимальные интегральные потоки явного тепла (637 МДж·м⁻² на станции “Игарка” и 379 МДж·м⁻² на станции “Тура”) были зарегистрированы в 2019 г., что соответствует минимальному количеству осадков за период наблюдений. Различия в энергетическом обмене между экосистемами отражают их структурные и функциональные особенности. Субарктическое болото продемонстрировало более высокую изменчивость потоков тепла, что может быть связано с особенностями гидрологического режима и меньшей устойчивостью к изменению основных метеорологических параметров по сравнению с лесной экосистемой.

Обе исследуемые экосистемы функционировали как устойчивые поглотители СО₂ в течение всех вегетационных периодов, что подтверждает их важную роль в глобальном углеродном цикле. Поглощение СО₂ варьировало от –62,9 до –120,2 *ц* за летний период на болоте и от –63,5 до –83,6 гС·м⁻² в лиственном лесу.

Максимальная поглотительная способность болотной экосистемы (–120,6 гС·м⁻² в 2022 г.) превышала таковую лесной экосистемы (–83,6 гС·м⁻² в 2023 г.), что может быть связано с различиями в структуре растительных сообществ и особенностями фотосинтетической активности. Высокие значения валовой первичной продукции на болоте (до 9,8 гС·м⁻²·сут.⁻¹) обеспечивались, вероятно, интенсивной фотосинтетической деятельностью мохового покрова и травянистой растительности при оптимальных условиях

увлажнения. Полученные значения NEE сопоставимы с данными других исследований в аналогичных экосистемах на территории России [24, 25], но демонстрируют более высокую поглотительную способность болотных экосистем по сравнению с лесными, что может быть специфической особенностью изучаемого региона.

Анализ межгодовой изменчивости показал, что основными факторами, определяющими функционирование экосистем, являются температурный режим, количество осадков и связанная с ними влажность почвы. Засушливые условия 2019 г. привели к минимальным значениям поглощения CO₂ и максимальным потокам явного тепла в обеих экосистемах. Напротив, благоприятные гидротермические условия 2022–2023 гг. способствовали максимальной углерод-поглотительной активности. Болотная экосистема продемонстрировала более высокую чувствительность к изменениям внешних условий, что проявилось в большей амплитуде колебаний всех исследуемых потоков. Это может быть связано с особенностями гидрологического режима болот и более тесной связью продуктивности растительности с уровнем грунтовых вод.

Полученные результаты имеют важное значение для понимания роли северных экосистем в глобальном климате. Устойчивая углерод-поглотительная функция исследованных экосистем в условиях потепления климата может способствовать смягчению антропогенного воздействия на атмосферу. Однако высокая чувствительность этих экосистем к метеорологическим условиям указывает на их уязвимость к изменениям климата. Особую важность представляет выявленная высокая продуктивность болотных экосистем, которые традиционно рассматривались как менее активные в отношении углеродного обмена по сравнению с лесными. Это требует пересмотра оценок вклада различных типов экосистем в региональный углеродный баланс.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 04.06.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Rantanen M., et al. The Arctic Has Warmed Nearly four Times Faster than the Globe Since 1979. *Communications Earth & Environment* **3** (2022), 168.
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
2. Yamanouchi T., Takata K. Rapid Change of the Arctic Climate System and its Global Influences. Overview of GRENE Arctic Climate Change Research Project (2011–2016). *Polar Science* **25** (2020), 100548.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100548>

3. Legg S. IPCC, 2021. Climate Change 2021 – the Physical Science Basis. *Interaction* **49** (2021), 44–45.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
4. Overland J., et al. The Urgency of Arctic Change. *Polar Science* **21** (2019), 6–13.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.11.008>
5. Screen J.A., Simmonds I. The Central Role of Diminishing Sea Ice in Recent Arctic Temperature Amplification. *Nature* **464** (2010), 1334–1337.
<https://doi.org/10.1038/nature09051>
6. Box J.E., et al. Key Indicators of Arctic Climate Change: 1971–2017. *Environ. Res. Lett.* **14** (2019), 045010.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b>
7. Ito A., et al. Pronounced and Unavoidable Impacts of Low-End Global Warming on Northern High-Latitude Land Ecosystems. *Environ. Res. Lett.* **15** (2020), 044006.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab702b>
8. Schulze E. D., et al. Productivity of Forests in the Eurosiberian Boreal Region and Their Potential to Act as a Carbon Sink – A Synthesis. *Global Change Biology* **5** (1999), 703–722.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00266.x>
9. Tchebakova N.M., Parfenova E., Soja A.J. The Effects of Climate, Permafrost and Fire on Vegetation Change in Siberia in a Changing climate. *Environ. Res. Lett.* **4** (2009), 045013.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045013>
10. Dolman A. J. Et Al. An Estimate of the Terrestrial Carbon Budget of Russia Using Inventory-Based, Eddy Covariance and Inversion Methods. *Biogeosciences* **9** (2012), 5323–5340.
<https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012>
11. Ольчев А.В., Маргарян В.Г., Седракан А.М. Концепция карбоновых полигонов и перспективы их развития в Армении. *Proc. of the YSU C: Geol. and Geograph. Sci.* **57** (2023), 248–254.
<https://doi.org/10.46991/pysu:c/2023.57.3.248>
12. Zamolodchikov D.G., et al. CO₂ Flux Measurements in Russian Far East Tundra Using Eddy Covariance and Closed Chamber Techniques. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* **55** (2011), 879–892.
<https://doi.org/10.1046/j.1435-6935.2003.00074.x>
13. Tuovinen J.P., et al. Interpreting Eddy Covariance Data from Heterogeneous Siberian Tundra: Land-Cover-Specific Methane Fluxes and Spatial Representativeness. *Biogeosciences* **16** (2019), 255–274.
<https://doi.org/10.5194/bg-16-255-2019>
14. Tchebakova N.M., et al. Agroclimatic Potential Across Central Siberia in an Altered Twenty-First Century. *Environ. Res. Lett.* **6** (2011), 045207.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045207>
15. Heimann M., Reichstein M. Terrestrial Ecosystem Carbon Dynamics and Climate Feedbacks. *Nature* **451** (2008), 289–292.
<https://doi.org/10.1038/nature06591>
16. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences* **11** (2007), 1633–1644.
<https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
17. Aubinet M., Vesala T., Papale D. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Springer Science & Business Media (2012), 438.
18. Burba G. *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. LI-Cor Biosciences (2013), 332.
19. Perez P.J., et al. Assessment of Reliability of Bowen Ratio Method for Partitioning Fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* **97** (1999), 141–150.
[https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(99)00080-5)
20. Wutzler T., et al. Basic and Extensible Post-Processing of Eddy Covariance Flux Data with Reddyproc. *Biogeosciences* **15** (2018), 5015–5030.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-5015-2018>
21. Vekuri H., et al. A Widely-Used Eddy Covariance Gap-Filling Method Creates Systematic Bias in Carbon Balance Estimates. *Scientific Reports* **13** (2023), 1720.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-28827-2>

22. Eugster W., et al. Land-Atmosphere Energy Exchange in Arctic Tundra and Boreal Forest: Available Data and Feedbacks to Climate. *Global Change Biology* **6** (2000), 84–115.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.06015.x>
23. Baldocchi D., et al. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bull. of the American Meteorolog. Soc.* **82** (2001), 2415–2434.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2)
24. Mamkin V., et al. Interannual Variability of the Ecosystem CO₂ Fluxes at Paludified Spruce Forest and Ombrotrophic Bog in Southern Taiga. *Atmosph. Chem. and Phys. Discuss.* **2021** (2021), 1–41.
<https://doi.org/10.5194/acp-23-2273-2023>
25. Dolman A.J., et al. An Estimate of the Terrestrial Carbon Budget of Russia Using Inventory-Based, Eddy Covariance and Inversion Methods. *Biogeosciences* **9** (2012), 5323–5340.
<https://doi.org/10.5194/bg-9-5323-2012>

Ե. Մ. ԳՈՐԲԱՐԵՆԿՈ, Վ. Ի. ԶԻՐՅԱՆՈՎ, Ա. Վ. ԳՈՐԲԱՐԵՆԿՈ,
Ա. Ս. ՊՐՈԿՈՒՇԿԻՆ, Ա. Վ. ՊԱՆՈՎ, Ա. Վ. ՕԼԶԵՎ

**ՀՅՈՒՄԻՍԱՅԻՆ ՍԻՔԻՐԻ ԱՆՏԱՌԱՅԻՆ ԵՎ ՃԱՀԱՅՏԱՅԻՆ
ԷԿՈՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ ԱԾԽԱԾՆԻ ԵՐԿՕՔՍԻՂԻ ԶԳԱՅՈՒՆ
ԵՎ ԹԱՔՆՎԱԾ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀՈՍՔԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ
ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Ա մ փ ո փ ու մ

Բարձր լայնություններում կլիմայի փոփոխությունը տեղի է ունենում ավելի արագ տեմպերով, քան մյուս տարածաշրջաններում: Բևեռային էկոհամակարգերը հատկապես խոցելի են և ենթակա են նման փոփոխությունների: Բուսականության արձագանքը շրջակա միջավայրի պայմանների փոփոխություններին հիմնականում դրսևորվում է էկոհամակարգերի աշխատանքի փոփոխության միջոցով, որն իր հերթին ազդում է ջրային գոլորշիների (H₂O) և ածխածնի երկօքսիդի (CO₂) հոսքերի վրա: Հետազոտության հիմնական նպատակն է վերլուծել CO₂-ի և զգայուն (H) ու թաքնված ջերմության (LE) հոսքերի գուտ էկոհամակարգի փոխանակման սեզոնային փոփոխականությունը հյուսիսային Սիբիրում գտնվող մերձարկտիկական ճահճում և հյուսիսային տայգայի խեժափիճու անտառում: Նոր փորձարարական տվյալներ են ստացվել՝ օգտագործելով տուրբուլենտ պուլսացիայի մեթոդը 2019–2023 թթ. համար: Արդյունքները ցույց են տվել, որ երկու էկոհամակարգերն էլ հետևողականորեն կլանել են CO₂ մթնոլորտից՝ չնայած օդերևութաբանական պայմանների զգալի միջտարեկան տատանումներին: 2019–2023 թվականներին NEE-ն վեգետացիայի ընթացքում կազմում է $-62,9$ -ից $-120,2$ $gC \cdot m^{-2}$ մերձարկտիկական ճահիճում և $-63,5$ -ից $-83,6$ $gC \cdot m^{-2}$ լայնատերև անտառում: H և LE հոսքերը նույնպես ցույց են տվել զգալի միջտարեկան տատանումներ, որոնք հիմնականում որոշվում են արեգակնային ճառագայթման մուտքով և տեղումների տատանումներով:

E. M. GORBARENKO, V. I. ZYRYANOV, A. V. GORBARENKO,
A.S. PROKUSHKIN, A.V. PANOV, A.V. OLCHEV

SEASONAL VARIABILITY OF CARBON DIOXIDE, SENSIBLE AND LATENT HEAT FLUXES IN FOREST AND PEATLAND ECOSYSTEMS OF NORTH SIBERIA

Summary

The effects of climate change are particularly pronounced in high-latitude regions, with polar environments showing heightened sensitivity to environmental shifts. Plant responses to these alterations are primarily observable through changes in ecosystem processes, especially in terms of water vapor and CO₂ exchange patterns. This research investigated the seasonal patterns of CO₂ net ecosystem exchange (NEE) and heat transfer (both sensible and latent) in two Northern Siberian ecosystems: a subarctic palsa mire and a mature larch forest. The investigation, spanning from 2019 to 2023, employed eddy covariance techniques to gather new data on how these ecosystems respond to atmospheric changes. The findings revealed that both sites consistently uptake more atmospheric CO₂ than they released, despite fluctuating weather conditions between years. During growing seasons, the palsa mire's NEE readings ranged between -62.9 and $-120.2 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ while the larch forest showed values from -63.5 to $-83.6 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$. The heat flux measurements demonstrated substantial year-to-year variability, which was largely influenced by changes in solar radiation levels and rainfall patterns.