

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.4

Эмиссия и поглощение парниковых газов луговой экосистемой южной тайги Западной Сибири: оценка вклада почвенной составляющей по данным наблюдений 2023 г.

**М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан[✉], Д.К. Давыдов,
А.В. Козлов, А.В. Фофонов***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 19.01.2024;
после доработки 11.06.2024;
принята к печати 19.06.2024

Современные изменения глобального климата сопровождаются ростом температуры воздуха и почвы. Как они отражаются на почвенном дыхании и следует ли ожидать изменение эмиссии парниковых газов? На эти вопросы невозможно ответить без исследования газообмена почвы и атмосферы. В настоящей работе приводятся результаты анализа удельных потоков парниковых газов на границе раздела «почва – атмосфера», измеренных в обсерватории «Фоновая» в 2023 г. Для измерения потоков были использованы три статические камеры: прозрачная и непрозрачная – на участках почвы с растительностью, и еще одна прозрачная – на участке почвы без растительности. Для CO_2 и CH_4 был зафиксирован устойчивый сток в течение всего вегетационного сезона, для N_2O , наоборот, – слабая положительная эмиссия. Устойчивый сток углекислого газа из атмосферы наблюдался в период с мая до середины августа, его величина достигала $-600 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в июне и июле, а величина стока метана составляла $-0,08 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Поток закиси азота колебался вблизи нуля, а его среднесуточные вариации почти укладывались в коридор $\pm 0,02 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Установлена нелинейная положительная зависимость увеличения интенсивности дыхания экосистемы, т.е. эмиссии CO_2 , от температуры почвы. Для метана получены линейные отрицательные зависимости во всех трех камерах – рост температуры почвы усиливает его поглощение. У N_2O очень слабые положительные зависимости в обеих прозрачных камерах (с растительностью и без нее). Оценки вклада эмиссии CO_2 из почвы показали, что в ночное время микробное дыхание может вносить вклад в общее дыхание экосистемы от 46,7 до 77,9%. В среднем за сутки доля поглощения метана почвой, обусловленного диффузией и свободной метанотрофией, изменяется от 5,3 до 48,3%. Меньше она становится в дневное время и увеличивается в ночное. Вклад почвы без растительности в общую эмиссию N_2O может составлять до 92,3%. Полученные результаты должны расширить сведения о газообмене «почва – атмосфера» в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: атмосфера, воздух, закись азота, метан, поток, углекислый газ, эмиссия; atmosphere, air, methane, nitrous oxide, flux, carbon dioxide, emission.

Введение

Одной из основных проблем, стоящих перед человечеством в последние десятилетия, является продолжающееся глобальное потепление климата [1]. По заключению МГЭИК, причина этого процесса – увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере и вызываемый ими дополнительный приток тепла в атмосферу [2]. В первую очередь это касается углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O), рост содержания которых в воздухе также продолжается [3–5]. Точная оценка выбросов парниковых газов и их перераспределения

между атмосферой, океаном и земной биосферой в условиях меняющегося климата имеет решающее значение для лучшего понимания этого процесса, разработки климатической политики и прогнозирования будущих изменений. Несмотря на большой прогресс в исследовании пространственно-временной изменчивости перечисленных газов на планете, в оценках их баланса все еще сохраняются значительные неопределенности [2]. Следовательно, не все источники поступления и процессы стока парниковых газов учтены корректно.

В общем балансе углекислого газа, метана и закиси азота в воздухе важнейшую роль играет обмен ими между атмосферой и почвой [6]. Причем почва может являться как источником, так и стоком для данных компонентов воздуха. Для определения мощности эмиссии или стока в естественных условиях измерения проводятся в удаленных (фоновых) районах, где антропогенное влияние на них мини-

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

мально. Для этого, как правило, используются методы вихревой ковариации (eddy covariance, или турбулентных пульсаций) [7], градиентные или камерные [8]. Метод вихревой ковариации считается самым точным и рассматривается в качестве эталонного при сравнении данных измерений [9]. Сопоставление методов показало, что они дают близкие результаты. Так, в [10] показано, что вихревой метод на 25% завышает чистую продукцию лесной экосистемы (net ecosystem production, NEP) и на 10% занижает ее дыхание (ecosystem respiration, ER).

В настоящей работе анализируются данные о потоках парниковых газов, полученные методом статических камер. Методические аспекты таких измерений достаточно хорошо освещены в литературе и доведены уже до уровня инструкций [11–14]. Проведены сотни экспериментов в различных географических районах планеты и разных гидрометеорологических условиях, что позволило обобщить основные процессы газообмена CO_2 , CH_4 и N_2O между почвой и атмосферой (например, [15]). Следует подчеркнуть, что у камерного метода, в отличие от других, имеется возможность разделения составляющих общего потока парниковых газов на границе раздела «почва – атмосфера» [11–14]. Правда, это его достоинство редко использовалось при анализе результатов в вышеупомянутых публикациях.

Цель настоящей работы – исследование потоков CO_2 , CH_4 и N_2O и оценка их составляющих в одном из фоновых районов Томской области.

1. Район и методы измерений

Измерения потоков парниковых газов осуществлялись на участке с луговой экосистемой на территории обсерватории «Фоновая», расположенной на восточном берегу р. Оби в 60 км к западу от Томска (56°25'07" с.ш., 84°04'27" в.д.) на высоте 139 м н.у.м. Тип биогеоценоза на измерительной площадке – разнотравно-злаковый луг (во время половодья никогда не затопливается), почва –

аллювиальная серогумусовая (дерновая) глеевая (AYg–G–CG~ по классификации 2004 г.). Травостой представлен преимущественно мятликом узколистным (*Poa angustifolia* L.; ≈ 50%) и кострецом безостым (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub.; ≈ 30%), а также пыреем ползучим (*Agropyron repens*), канареечником тростниковидным (*Phalaris arundinacea* L.), мышиным горошком (*Vicia cracca*), одуванчиком лекарственным (*Taraxacum officinale*) и другим разнотравьем.

Обсерватория окружена массивами смешанного леса, типичными для южной тайги Западной Сибири. Крупные промышленные объекты вблизи обсерватории отсутствуют. Описание всего измерительного комплекса обсерватории приведено в [16].

Для измерения потоков парниковых газов между почвой и атмосферой в течение вегетационного сезона использовался ранее разработанный в ИОА СО РАН комплекс, состоящий из газоанализатора $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ Picarro G2508 и автоматической системы статических камер (непрозрачной и прозрачной, рис. 1, б) [17]. Анализатор G2508 работает в режиме рециркуляции с помощью вакуумного насоса Picarro A0702. Камеры объемом 0,324 м³ открываются и закрываются с помощью автоматизированной пневматической системы управления в следующей последовательности: 1) темная камера закрыта, прозрачная открыта (5 мин); 2) наоборот (8 мин); 3) обе камеры открыты (7 мин) на проветривание с целью поддержания условий естественного состояния экосистемы и т.д. (всего три цикла в час).

Растительный покров наземных экосистем в результате фотосинтеза ассимилирует углерод [13], который формирует валовую первичную продукцию растительности (gross primary production, GPP). Около 50–60% абсорбированного растениями углерода возвращается в атмосферу в результате дыхания экосистемы (ER), которое складывается из дыхания наземных органов растений (above phytomass respiration, APR) и дыхания почвы (soil respiration, SR). Последнее, в свою очередь, разделяют



Рис. 1. Внешний вид: малогабаритной прозрачной камеры, установленной на участке без растительности (б); темной и прозрачной камер на участке с растительностью (а)

на два основных компонента: 1) дыхание корней (root respiration, RR) и связанное с ним дыхание ризосферной микрофлоры (rhizomicrobial respiration, RMR), 2) дыхание почвенных микроорганизмов (microbial respiration, MR), которые разлагают почвенное органическое вещество [13]. Показателем интенсивности процесса аккумуляции атмосферного углерода растительным покровом является чистая первичная продукция (net primary production, NPP), определяемая как [13]:

$$NPP = GPP - AR, \quad (1)$$

где AR = APR + RR + RMR — суммарная интенсивность дыхания растений (autotrophic respiration).

Прозрачная камера (Т — transparent), установленная на участке с растительностью, позволяет измерять удельный поток, который представляет собой чистый экосистемный обмен (net ecosystem exchange, NEE) [13]:

$$[F_{CO_2}]_T = NEE_{CO_2} = ER - GPP = APR + SR - GPP = \\ = APR + RR + RMR + MR - GPP. \quad (2)$$

С помощью темной (непрозрачной, О — opaque) камеры измерялся удельный поток CO₂, характеризующий суммарное дыхание экосистемы:

$$[F_{CO_2}]_O = ER = APR + SR = \\ = APR + RR + RMR + MR. \quad (3)$$

Следовательно, при анализе NEE и ER невозможно разделить вклады таких составляющих углеродного баланса, как автотрофное (AR) и микробное (MR) дыхание.

Для решения этой задачи в августе 2023 г. в обсерватории «Фоновая» на участке почвы площадью 1 м², с которого предварительно удалили всю растительность, была дополнительно установлена вторая прозрачная камера (рис. 1, а). В отличие от ранее установленных она является малогабаритной: внутренний диаметр 104 мм, высота измерительной части (от поверхности почвы до крышки) 350 мм. Новая камера была интегрирована в имеющийся комплекс измерения потоков парниковых газов так, чтобы во время режима проветривания первых двух камер (7 мин) первые 3 мин происходила продувка трубок (подводящей к ней и отводящей от нее), а в течение оставшихся 4 мин осуществлялось непосредственно измерение. В ранее разработанное программное обеспечение, которое управляет всем процессом и регистрацией данных, были внесены соответствующие изменения. Это позволило измерять дыхание (эмиссию CO₂) только почвенных микроорганизмов.

Измеряемый с помощью камер удельный поток метана на границе раздела «почва—атмосфера» определяется естественными процессами [15, 18–23], которые в упрощенном виде можно записать как

$$F_{CH_4} = MG + PMT \pm PME + ME \pm MD - MO, \quad (3)$$

где MG — выделение CH₄ в результате метаногенеза (methanogenesis); PMT — транспорт метана сосудистыми растениями из почвы в атмосферу (plant-

mediated transport); PME — обмен метана, опосредованный растениями за счет метаногенов (+) и метанотрофов (–), ассоциированных с побегами и корнями (plant-mediated exchange); ME — пузырьковый перенос (methane ebullition); MD — диффузия метана в почву/из почвы (methane diffusion), знак которой зависит от градиента концентрации CH₄ между атмосферой и почвой; MO — окисление (methane oxidation) метанотрофными и автотрофными аммонийоксилирующими бактериями.

Известно, что естественные луга являются источником метана из атмосферы [18]. При этом скорость его поглощения из атмосферы почвой определяется диффузией [22], которая, в свою очередь, служит главным лимитирующим фактором окисления CH₄ метанотрофами в большинстве типов почв [24]. Сама же диффузия зависит от влажности почвы. В сильно увлажненных почвах она падает из-за уменьшения количества пор, заполненных воздухом [18]. Несмотря на то что при обильном выпадении осадков создаются благоприятные условия для метаногенеза, повышающего концентрацию CH₄ в почве [25], его эмиссия из луговых экосистем пренебрежимо мала из-за ослабления диффузии [26]. Пузырьковый же перенос CH₄ характерен для водных экосистем [19]. Следовательно, в нашем случае уравнение (3) для удельного потока, измеряемого с помощью прозрачной камеры на участке почвы без растительности (S — soil), можно записать в упрощенном виде:

$$[F_{CH_4}]_S = -MD - MO; \quad (4)$$

а для прозрачной и темной камер с растительностью

$$[F_{CH_4}]_T = PMT - PME + [F_{CH_4}]_S, \\ [F_{CO_2}]_O = PMT - PME + [F_{CH_4}]_S. \quad (5)$$

Таким образом, комбинация из трех камер дала возможность оценивать и отдельные составляющие углеродного цикла.

Что же касается потоков закиси азота, то при их измерении существуют значительные неопределенности. Большая часть имеющихся в настоящее время данных получена с использованием камерного метода, и они указывают на поглощение N₂O почвами. Однако многие авторы связывают это с техническими ограничениями — пределом обнаружения и точностью измерения самой концентрации N₂O [27]. Некоторые исследования с использованием других методов указывают на то, что поглощение N₂O возможно главным образом в дневное время [28, 29]. Поток закиси азота на границе раздела «почва—атмосфера» определяется следующими процессами [15, 27, 30]:

$$F_{N_2O} = NA + DN \pm NOD, \quad (6)$$

где NA и DN — нитрификация NH₄⁺ (nitrification of ammonium) и денитрификация NO₃[–] (denitrification of nitrate) почвенными микроорганизмами соответственно; NOD — диффузия закиси азота в почву/из почвы (nitrous oxide diffusion), знак которой зависит от градиента концентрации N₂O между ат-

мосферой и почвой. Во влажных почвах преобладает денитрификационный механизм образования закиси азота, а в менее увлажненных — нитрификационный [15].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Среднесуточные потоки

Мониторинг потоков газов был начат в обсерватории в 2023 г. в первых числах мая и закончен в середине октября. На рис. 2 (цв. вкладка) представлены результаты измерений удельных потоков углекислого газа, метана и закиси азота с использованием трех камер.

Из рис. 2, *а* видно, что устойчивый сток углекислого газа из атмосферы наблюдался в период с мая до середины августа. Его величина достигает $-600 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в июне и июле. В этот же период усиливалось и дыхание экосистемы (ER) до $500 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что видно из данных темной камеры. С середины августа вегетационная активность растительности стала угасать. Это отразилось на величине потоков в прозрачной и темной камерах. Потоки в камере, установленной на участке почвы без растительности, имели промежуточное значение. Это означает, что дыхание почвы составляет только часть от общего газообмена CO_2 . Сопоставление динамики потоков CO_2 и температуры почвы (рис. 2, *а* и *г*) показывает, что все их долгопериодные вариации взаимосвязаны. Особенно сильно это заметно по данным, полученным с помощью темной камеры.

Луговой участок почвы обсерватории «Фоновая» также является местом стока метана из атмосферы (рис. 2, *б*). Величина потока может достигать $-0,08 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Основной его период совпадает с таким же для CO_2 . Можно отметить различия в процессах стока CO_2 и CH_4 . Сравнение рис. 2, *б* и *г* показывает, что для метана характерен монотонный рост интенсивности стока, который на первый взгляд мало зависит от температуры почвы. Вероятно, при наличии растительности существенную роль в стоке метана из атмосферы играют ассоциированные с ней метанотрофы [23, 31], поскольку после уменьшения вегетационной активности (середина августа) величина потока в камере без растительности приближается к нулю (рис. 2, *б*).

Авторы [31] показали, что увеличение интенсивности суммарного дыхания растений (эмиссии CO_2) приводит к росту удельного потребления метана, причем с линейной зависимостью ($R^2 = 0,81$), и дали этому эффекту количественное теоретическое объяснение. Согласно их выводам вклад ассоциированной с корнями растений метанотрофии в общее потребление метана почвой травяно-мохового яруса в лесных экосистемах южной тайги Западной Сибири является существенным и его следует учитывать при расчетах баланса метана, так как расчеты потоков с учетом данного механизма поглощения CH_4 и свободной (не ассоциированной с растениями) метанотрофии продемонстрировали

хорошее согласие с экспериментальными данными [31].

Потоки закиси азота колеблются вблизи нуля, а его среднесуточные вариации почти укладываются в коридор значений $\pm 0,02 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (рис. 2, *в*). Сами колебания N_2O имеют более высокую частоту и слабо связаны с температурой почвы (рис. 2, *г*). Авторы [15] связывают выраженный пульсирующий характер эмиссионного потока N_2O с изменением влажности и температуры, которые способствуют «выбросу» закиси азота из почвенного раствора.

2.2. Дневные и ночные потоки

Поскольку на процессы газообмена между почвой и атмосферой заметно влияет фотосинтез, то целесообразно их рассмотреть для дневных и ночных условий раздельно. Проведенный нами анализ выявил заметные различия в потоках CO_2 и CH_4 , наблюдавшихся в полуденное и темное время суток. Для N_2O на фоне низких и переменных величин потоков значительной разницы обнаружено не было.

На рис. 3 (цв. вкладка) приведено сопоставление средних дневных (10:00–14:00, местное время) и средних ночных (22:00–02:00) потоков CO_2 . Рис. 3, *а* показывает, что средние дневные потоки CO_2 достигают минимальных значений (сток) $\approx -2000 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в июне, когда вегетационная активность растительности максимальна. Причем несмотря на ее резкое уменьшение к середине августа, отрицательные значения F_{CO_2} сохраняются до середины октября. Это говорит о том, что поглощение CO_2 растениями продолжалось. При этом и ER, и MR (камера без растительности) в этот период демонстрировали положительные значения — поступление CO_2 в атмосферу.

Прежде чем анализировать рис. 3, *б*, следует указать, что используемые темная и прозрачная камеры, установленные на участках с растительностью, имеют абсолютно одинаковые геометрические размеры и расположены рядом. Их основания были врезаны в почву еще в 2016 г. Внутри — схожая растительность. Измерения осуществляются одним и тем же газоанализатором.

Среднесуточные значения удельных потоков CO_2 для этих камер, представленные на рис. 3, *б*, должны также быть близкими по значению, так как в ночное время с помощью обеих камер измеряется только дыхание экосистемы. Видно, что величины потоков совпадают только в начале и конце периода вегетационной активности. В период же максимума они различаются почти в два раза. Очевидно, что такие различия создаются за счет угнетения растительности в темной камере из-за того, что в течение 15 мин каждого часа она закрыта и, как следствие, получает на 25% меньше солнечной радиации, чем прозрачная. На такой факт указывают многие авторы, например [9].

Имеются дневные и ночные различия и в среднесуточных значениях потоков метана (рис. 4, цв. вкладка). Во-первых, и в дневное, и в ночное время в период активной вегетации сохраняются

большие различия в потоках (рис. 4), измеренных прозрачной и темной камерами. В период ее спада различия нивелируются. Это, на наш взгляд, говорит о том, что вклад метанотрофии, ассоциированной с растительностью, в сток CH_4 в темной камере меньше, чем в прозрачной, вследствие меньшего количества в ней микроорганизмов, окисляющих метан. Во-вторых, дневные потоки метана в период вегетационной активности на 20–30% больше, чем ночные. Пока трудно этот факт связать с каким-то процессом.

2.3. Суточный ход

Обратимся к суточному ходу потоков парниковых газов, измеренных с помощью трех камер (рис. 5, цв. вкладка).

2.3.1. Углекислый газ

На рис. 5, *а* представлен усредненный за разные месяцы вегетационного периода 2023 г. суточный ход потоков CO_2 , полученных с помощью прозрачной камеры. Видно, что по сравнению с предыдущими годами [32] качественно он не изменился — максимальное поглощение углекислого газа наблюдалось в июне.

Рис. 5, *б* показывает, что для потоков CO_2 в темной камере в течение всего вегетационного сезона характерно наличие утреннего минимума вблизи 06:00–08:00 и широкого дневного максимума с 10:00 до 20:00. Заметен также внутрисезонный ход. Наибольшие потоки фиксируются в июне и июле, наименьшие — в мае и октябре. Поскольку речь идет о ER, то это, скорее всего, отражает суточный ход температуры почвы. В следующем разделе вернемся к этому вопросу.

Для MR неожиданно обнаруживается вечерний или ночной максимум и минимум в дневное время (рис. 5, *в*). Максимально это дыхание было в августе (начало измерений) и уменьшилось в октябре. Пока трудно объяснить такой суточный ход.

2.3.2. Метан

Измеренные в прозрачной и темной камерах с растительностью потоки метана (рис. 5, *г* и *д*) имели схожую картину суточного хода с максимумом его поглощения в дневное время с июня по октябрь. Поскольку жизнедеятельность микроорганизмов, окисляющих метан, сильно зависит от степени прогрева почвы, в мае суточный ход был менее выражен. Отличия в абсолютных значениях потоков можно объяснить тем, что в непрозрачной камере, как уже отмечалось выше, растительность была менее развитой и, следовательно, роль процессов окисления CH_4 метанотрофами, ассоциированными с побегами и корнями, была меньше, чем в прозрачной.

Какого-либо выраженного суточного хода потоков CH_4 , измеренных с помощью камеры без расти-

тельности за три месяца, не наблюдалось (рис. 5, *е*). Поглощение метана почвой было наибольшим в августе и уменьшилось до нуля в октябре. Возможно, это объясняется влиянием температуры почвы на процессы свободной метанотрофии.

2.3.3. Закись азота

Измерения потоков N_2O показали, что наиболее выраженный суточный ход с дневным максимумом наблюдался на участке с растительностью, на котором установлена прозрачная камера (рис. 5, *ж*). Максимальная дневная эмиссия N_2O была зарегистрирована в июне и июле, что обусловлено активизацией в этот период почвенных микроорганизмов, участвующих в биохимических процессах нитрификации и денитрификации. Изменения в течение суток потоков закиси азота, измеренных с помощью как темной камеры с растительностью (рис. 5, *з*), так и прозрачной камеры без нее (рис. 5, *и*), демонстрируют случайный характер, который, скорее всего, определяется процессом диффузии N_2O в почву/из почвы.

2.4. Сезонный ход

Проанализируем сезонную динамику потоков парниковых газов в 2023 г. по их среднемесячным значениям (рис. 6, цв. вкладка). На рисунок для сопоставления также добавлены данные за предыдущие годы. Во время измерительного сезона 2023 г. в обсерватории «Фоновая» наблюдался сток углекислого газа из атмосферы (рис. 6, *а*). Наиболее сильным он был в июне, затем резко уменьшился почти до нуля, и такое его значение сохранялось до конца вегетационного сезона. Подобный сезонный ход наблюдался также в 2020 г. Если сопоставить рис. 2, *а* и рис. 6, *а*, то легко увидеть, что уменьшение интенсивности поглощения диоксида углерода началось раньше, чем уменьшилась вегетационная активность растительности. По сравнению с предыдущими годами 2023 г. является промежуточным по величине обмена CO_2 между атмосферой и почвой (NEE). Для метана также характерен сток в течение всего вегетационного сезона (рис. 6, *б*). Причем в 2023 г. он был наибольшим по сравнению с предыдущими годами. Так же, как и у CO_2 , уменьшение величины стока началось раньше, чем спад вегетационной активности (рис. 2, *б* и рис. 6, *б*). Потоки закиси азота ведут себя противоположным образом (рис. 6, *в*). Хотя сами потоки небольшие по величине, в июне они возрастают до максимальных значений, а затем медленно уменьшаются до конца вегетационного сезона. По сравнению с предыдущими годами в 2023 г. значения потоков N_2O были несколько ниже средних многолетних, вероятно, из-за меньшего количества выпавших осадков (рис. 6, *г*).

Таким образом, сезонный ход потоков парниковых газов в 2023 г. имел несколько аномалий по сравнению с предыдущими годами [32].

2.5. Зависимость величины потоков от температуры почвы

Поскольку в предыдущих разделах несколько раз отмечалась зависимость изменения величины потоков парниковых газов от температуры почвы, то можно предположить наличие аналогичных зависимостей от интенсивности солнечной радиации и температуры воздуха. Известно, что поглощение солнечной радиации приводит к нагреву воздуха.

На рис. 7 графики для CO_2 приведены раздельно для дневных значений потоков в прозрачной камере, темной с растительностью и прозрачной без нее, так как зависимости потоков от температуры почвы заметно отличаются. Для потоков, измеренных в прозрачной камере в дневное время, наблюдалась тенденция усиления стока CO_2 с ростом температуры (рис. 7, а). В ночное же время как в этой, так и в среднем за сутки в двух других камерах (рис. 7, б) прослеживается нелинейная положительная зависимость ER и MR.

Для потоков метана были получены линейные отрицательные зависимости от температуры во всех трех камерах (рис. 7, в), т.е. с ростом температуры почвы усиливается его поглощение разнотравно-злаковой луговой экосистемой.

Наконец, можно обнаружить только очень слабые положительные зависимости потоков N_2O в прозрачных камерах с растительностью и без нее (рис. 7, г). С ростом температуры почвы немного увеличивается поступление закиси азота с поверхности почвы. В темной камере фактически наблюдается нейтральный ход.

Поскольку полученная зависимость дневных потоков CO_2 от температуры почвы в прозрачной камере слабая ($R = -0,30$; см. рис. 7, а), то очевидно, что чистый экосистемный обмен в дневное время определяется прежде всего количеством солнечной радиации, достигающей земной поверхности. На рис. 8 представлены зависимости средних дневных значений NEE от плотности потока фотосинтетически активной радиации (PAR; $400 \text{ нм} < \lambda < 700 \text{ нм}$),

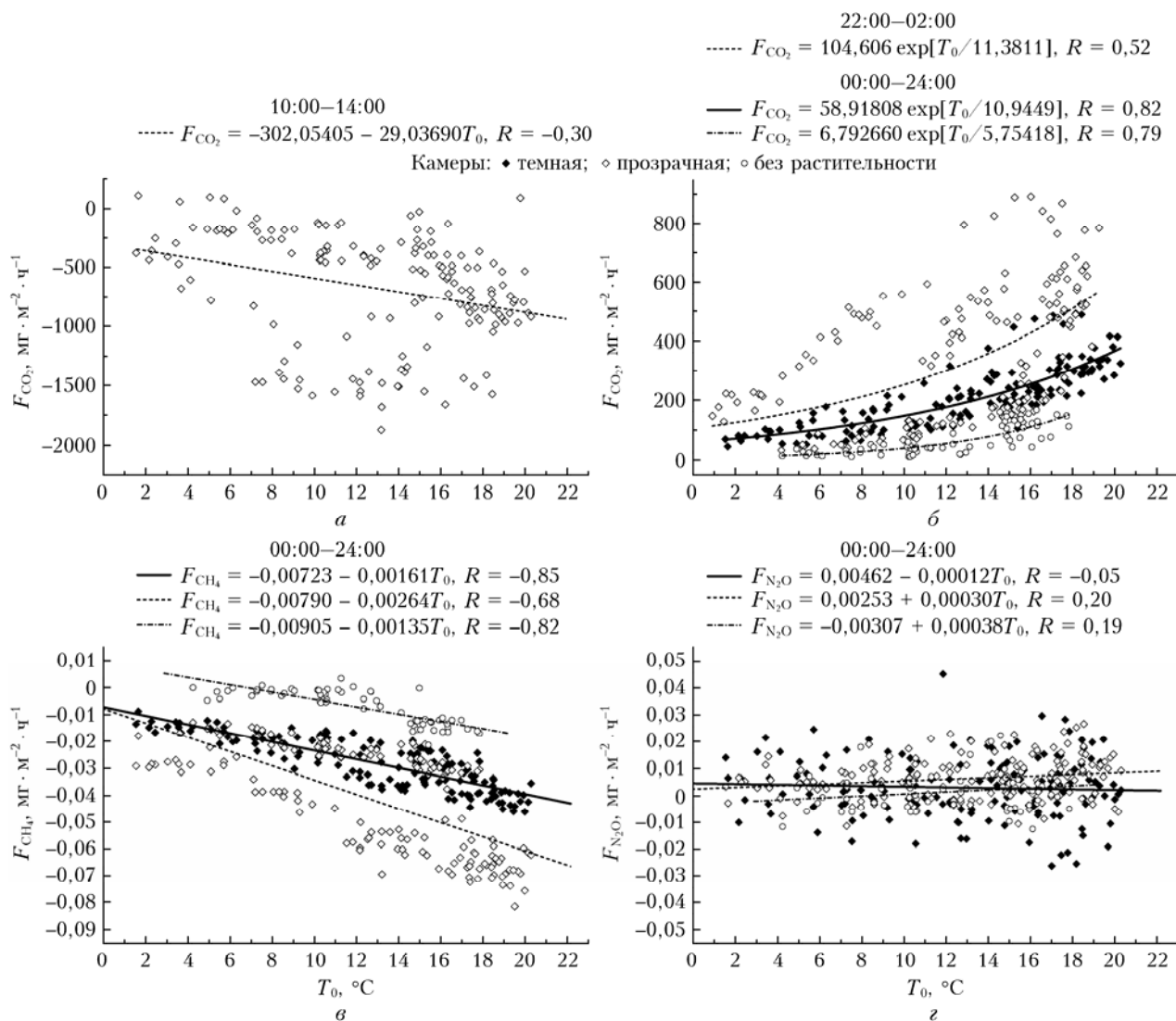


Рис. 7. Зависимость среднесуточных удельных потоков CO_2 (а, б), CH_4 (в), N_2O (г) от среднесуточной температуры поверхности почвы (T_0)

измерявшегося датчиком PQS1 (Kipp & Zonen B.V., Нидерланды). Видно, что значимая отрицательная линейная связь наблюдается с июня по сентябрь включительно. В связи с тем, что с момента весеннего возобновления фотосинтеза начинается интенсивный рост биомассы, приводящий к быстрым изменениям суммарной поверхности растений, поглощающих CO_2 , для мая характерен более крутой наклон линейной регрессии на фоне большего разброса самих значений. В октябре же эффективность фотосинтеза падает почти до нуля и зависимость дневных значений NEE от PAR становится менее значительной.

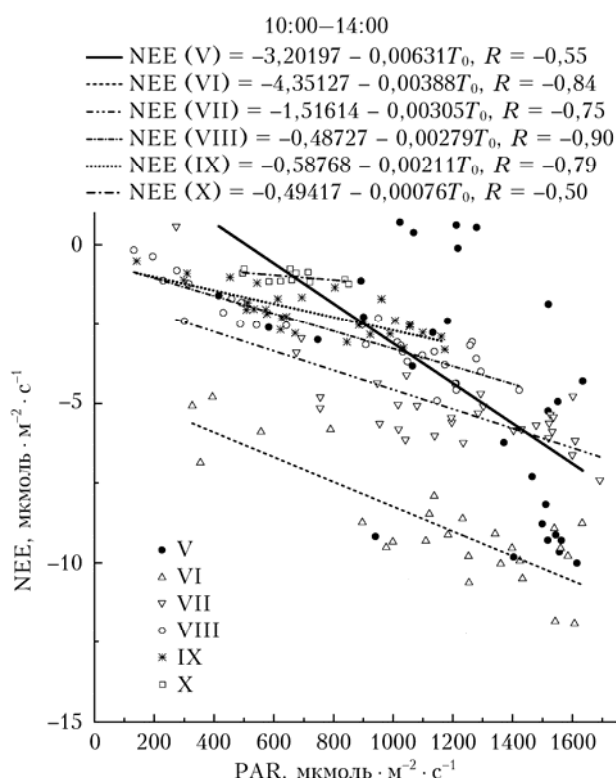


Рис. 8. Зависимость средних дневных (10:00–14:00) значений удельных потоков CO_2 в прозрачной камере с растительностью от среднего дневного значения (10:00–14:00) плотности потока фотосинтетически активной радиации

Таким образом, при формировании потоков парниковых газов на границе системы «почва–атмосфера» существует их зависимость от температуры почвы, за исключением дневного NEE, кото-

рый в первую очередь определяется плотностью фотосинтетического фотонного потока.

2.6. Соотношение потоков

2.6.1. Углекислый газ

Выше, при анализе потоков парниковых газов, мы отметили, что из-за нарушения естественных биологических циклов, связанного с искусственным созданием ночных условий на участке с темной камерой три раза в час, происходит угнетение растительности. В связи с этим использовать полученные на этом участке данные для оценки вклада MR будет некорректно. Следовательно, такую оценку можно произвести только по данным ночных потоков (22:00–02:00), полученным с помощью прозрачных камер с растительностью и без нее. С помощью первой из них в ночное время регистрируется суммарное дыхание $ER = APR + SR = APR + RR + RMR + MR$, а второй – только MR. Значит, можно оценить, какой вклад в ER вносит MR. Результаты произведенных оценок для периода, когда измерения CO_2 проводились с использованием этих камер одновременно, представлены в табл. 1, из которой следует, что в среднем дыхание почвенных микроорганизмов (MR) ночью может составлять от 46,7 до 77,9% от суммарного дыхания луговой экосистемы (ER). Вклад MR плавно изменяется по мере снижения температуры.

2.6.2. Метан

Согласно уравнениям (4) и (5) удельные потоки метана, измеряемые камерами на участке почвы без растительности $[F_{\text{CH}_4}]_s$, определяются только процессами диффузии и свободной метанотрофии (MD и MO), а на участках с растительностью $[F_{\text{CH}_4}]_r$ и $[F_{\text{CH}_4}]_o$ – еще и транспортом метана сосудистыми растениями из почвы в атмосферу и обменом, который связан с метанотрофами, ассоциированными с побегами и корнями. Следовательно, можно оценить вклад поглощения метана почвой, обусловленного диффузией и свободной метанотрофией (табл. 2), но по указанной в предыдущем разделе причине сделать это более корректно можно только по данным, полученным с помощью двух прозрачных камер. В среднем за сутки он изменяется от 5,3 до 48,3%. Вклад становится меньше в дневное время и увеличивается в ночное.

Таблица 1

Оценки вклада гетеротрофного дыхания в общее дыхание естественной луговой экосистемы в ночное время (22:00–02:00)

Удельный поток CO_2 , мг · м ⁻² · ч ⁻¹	VIII	IX	X
Прозрачная камера с растительностью (ER)	$179,8 \pm 39,6$	$111,5 \pm 50,1$	$59,5 \pm 20,4$
Прозрачная камера без растительности (MR)	$140,1 \pm 52,4$	$53,1 \pm 41,6$	$27,8 \pm 16,3$
MR/ER, %	77,9	47,6	46,7

Таблица 2

Оценки вклада диффузии и свободной метанотрофии в общий газообмен метана естественной луговой экосистемы в дневное и ночное время

Удельный поток CH_4 , $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$	VIII	IX	X
<i>Среднесуточные</i>			
Прозрачная камера с растительностью $[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{T}}$	$-0,029 \pm 0,003$	$-0,022 \pm 0,004$	$-0,019 \pm 0,004$
Прозрачная камера без растительности $[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{S}}$	$-0,014 \pm 0,004$	$-0,005 \pm 0,005$	$-0,001 \pm 0,001$
$[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{S}}/[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{T}}$, %	48,3	22,7	5,3
<i>Дневные (10:00–14:00)</i>			
Прозрачная камера с растительностью $[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{T}}$	$-0,036 \pm 0,008$	$-0,031 \pm 0,008$	$-0,023 \pm 0,004$
Прозрачная камера без растительности $[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{S}}$	$-0,012 \pm 0,005$	$-0,004 \pm 0,005$	$0,000 \pm 0,002$
$[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{S}}/[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{T}}$, %	33,3	12,9	0
<i>Ночные (22:00–02:00)</i>			
Прозрачная камера с растительностью $[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{T}}$	$-0,025 \pm 0,004$	$-0,018 \pm 0,005$	$-0,019 \pm 0,006$
Прозрачная камера без растительности $[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{S}}$	$-0,016 \pm 0,005$	$-0,005 \pm 0,006$	$-0,001 \pm 0,006$
$[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{S}}/[\text{F}_{\text{CH}_4}]_{\text{T}}$, %	64,0	27,8	5,3

2.6.3. Закись азота

Как уже упоминалось выше, газообмен закиси азота между почвой и атмосферой определяется почвенными процессами ее образования в результате нитрификации и денитрификации и ее эмиссии из почвы или стока из атмосферы за счет диффузии. Согласно данным, представленным в табл. 3, вклад почвы без растительности в общую эмиссию N_2O составлял 92,3 и 82,8% в августе и сентябре соответственно. В октябре же на участке почвы без растительности стала преобладать диффузия N_2O из атмосферы в почву. Оценить динамику потоков N_2O в дневное и ночное время, к сожалению, не удалось, так как полученные значения были очень малы, что приводило к большому разбросу значений отношений $[\text{F}_{\text{N}_2\text{O}}]_{\text{S}}/[\text{F}_{\text{N}_2\text{O}}]_{\text{T}}$.

В заключение этого раздела важно подчеркнуть, что приведенные здесь данные следует рассматривать как предварительные, так как они не охватывают весь сезон с мая по октябрь и получены только для одного года.

3. Сравнение с литературными данными

На территории Сибирского региона или смежных с ним измерения потоков углекислого газа проводились в основном на болотных участках [33–35]. Ближе всего к нашим оценкам по величине самих потоков и сезонному ходу оказались результаты, полученные либо в бореальном лесу [31, 36], либо на луговине [37]. Они значительно выше, чем

значения потоков, приводимые для данного региона в [38]. Возможно, такие различия обусловлены более северным расположением района исследований, описанных в этой публикации.

Достаточно много работ посвящено изучению потоков метана из болот или озер [39–43]. Подробно изучены ключевые лесные участки южной тайги Западной Сибири авторами [31]. Нами ранее было выполнено сопоставление потоков CO_2 и CH_4 , измеренных в обсерватории «Фоновая» [44] и на одном из пунктов Васюганского болота [33, 34]. Было выявлено, что болото — источник метана в течение всего сезона, в то время как в обсерватории «Фоновая» в среднем наблюдался его сток.

Величины потоков закиси азота, приведенные в [45–47], очень близки к значениям, полученным нами. Совпадают также суточные и сезонные вариации. Более того, малые значения потоков N_2O , фиксируемые во многих фоновых районах, позволили авторам [48] сделать вывод о необходимости увеличения числа камер для измерения потоков закиси азота с целью репрезентативности региональных оценок.

В ряде работ анализировались изменения величины потоков парниковых газов в зависимости от температуры почвы. Так, в [49, 50] было установлено, что поток CO_2 нелинейно возрастает при увеличении температуры почвы. Авторы [51] выявили линейную связь увеличения стока метана с ростом температуры. В [45] выделена очень слабая линейная связь потоков закиси азота и температуры почвы. Следовательно, полученные нами зависимости подтверждаются и исследованиями других авторов.

Таблица 3

Оценки вклада эмиссии закиси азота почвой без растительности в общий газообмен N_2O между луговой экосистемой и атмосферой

Удельный поток N_2O , $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$	VIII	IX	X
<i>Среднесуточные</i>			
Прозрачная камера с растительностью $[\text{F}_{\text{N}_2\text{O}}]_{\text{T}}$	$0,0026 \pm 0,0052$	$0,0029 \pm 0,0064$	$0,0015 \pm 0,0046$
Прозрачная камера без растительности $[\text{F}_{\text{N}_2\text{O}}]_{\text{S}}$	$0,0024 \pm 0,0095$	$0,0024 \pm 0,0066$	$-0,0026 \pm 0,0052$
$[\text{F}_{\text{N}_2\text{O}}]_{\text{S}}/[\text{F}_{\text{N}_2\text{O}}]_{\text{T}}$, %	92,3	82,8	н/о

Эмиссия и поглощение парниковых газов луговой экосистемой южной тайги Западной Сибири...

Работа [52] посвящена анализу измерений дыхания почвы в глобальном масштабе. Установлено, что оно может вносить вклад от 1,8 до 89,3% в общее дыхание системы «почва–атмосфера». Полученные нами оценки укладываются в этот диапазон. В [53] показано, что вклад почвенного дыхания увеличивается в ночное время и уменьшается в дневное, что подтверждает сделанные выше выводы. Наибольшая эмиссия из почвы фиксируется для углекислого газа, наименьшая — для закиси азота [54]. Это видно также из сопоставления данных табл. 1–3.

Заключение

Проведенный анализ потоков парниковых газов в обсерватории «Фоновая» в 2023 г. показал, что имелось несколько аномалий по сравнению с их динамикой, наблюдавшейся в предыдущие годы.

По-прежнему продолжался сток углекислого газа и метана из атмосферы. Наиболее сильным сток CO_2 был в июне, затем резко уменьшился почти до нуля. Это значение сохранялось до конца вегетационного сезона. Причем уменьшение поглощения диоксида углерода и метана началось раньше, чем уменьшилась вегетационная активность растительности. Отрицательные потоки (сток) метана в 2023 г. были наибольшими по абсолютной величине по сравнению с предыдущими годами. Потоки N_2O являются небольшими по величине, в июне они возрастали до максимальных значений, а затем медленно уменьшались до конца вегетационного сезона. По сравнению с предыдущими годами они были чуть меньше среднесуточных значений.

Среднесуточные значения показали, что устойчивый сток углекислого газа из атмосферы наблюдался в период с мая до середины августа. В этот же период усиливалось и дыхание луговой экосистемы. Основной период стока метана тот же, что и CO_2 . Поток закиси азота колебался вблизи нуля, а его среднесуточные вариации укладывались в коридор $\approx \pm 0,02$, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

В 2023 г. были выявлены особенности и в суточном ходе потоков парниковых газов. Так, для CO_2 в темной камере в течение всего вегетационного сезона характерно наличие утреннего минимума вблизи 06:00–08:00 и широкого дневного максимума с 10:00 до 20:00. В дневное время сток метана усиливается. Закись азота демонстрировала случайный характер изменения потоков в течение суток. В микробном дыхании почвы для углекислого газа неожиданно было зафиксировано наличие вечернего или ночного максимума и минимума в дневное время. Пока трудно объяснить такой суточный ход. На участке почвы без растительности явно выраженного суточного хода потоков CH_4 и N_2O не наблюдалось.

Анализ взаимосвязи величины удельных потоков парниковых газов и температуры почвы показал, что в прозрачной камере с растительностью

имеется небольшая тенденция усиления стока CO_2 с ростом температуры. Наблюдается нелинейная положительная зависимость дыхания луговой экосистемы в целом и микробного дыхания почвы в частности. Для метана были получены отрицательные линейные зависимости во всех трех камерах, т.е. рост температуры почвы усиливает его поглощение луговой экосистемой. Для N_2O были выявлены очень слабые положительные зависимости в прозрачных камерах с растительностью и без нее. С ростом температуры почвы незначительно увеличивается эмиссия закиси азота с поверхности почвы. Среднесуточные вариации потоков N_2O , измеренных с помощью как темной камеры с растительностью, так и прозрачной камеры на участке без нее, скорее отражали преобладание диффузионного механизма газообмена между почвой и атмосферой над биохимическим.

Оценки вкладов эмиссии CO_2 в общее дыхание экосистемы показывают, что в ночное время микробное дыхание почвы может вносить от 46,7 до 77,9%. Вклад поглощения метана почвой, обусловленного диффузией и свободной метанотрофией, в среднем за сутки изменяется от 5,3 до 48,3%. Его величина становится меньше в дневное время и увеличивается в ночное. Вклад почвы с удаленной растительностью в общую эмиссию N_2O может составлять до 92,3%. Важно подчеркнуть, что приведенные здесь данные следует рассматривать как предварительные. Они не охватывают весь сезон и получены только для одного года.

Измерения потоков с помощью темной камеры показали, что ее длительное использование на одном и том же участке почвы приводит к угнетению растительности вследствие нарушения естественных биологических циклов, связанного с искусственным созданием ночных условий три раза в час. В связи с этим в дальнейшем планируется переделать темную камеру в прозрачную, для того чтобы оценить влияние неоднородности луговой экосистемы на потоки парниковых газов в целом и их измерения с использованием системы вихревой ковариации, установка которой запланирована на 2024 г.

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Список литературы

1. Tollefson J. Earth's hottest month: These charts show what happened in July and what comes next // *Nature*. 2023. V. 620, N 7975. P. 703–704. DOI: 10.1038/d41586-023-02552-2.
2. IPCC: Summary for Policymakers // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Work-*

- ing Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
3. Ramonet M., Ciais Ph., Sha M.K., Steinbacher M., Sweeney C. CO₂ in the atmosphere: Growth and trends since 1850 // Oxford Research Encyclopedias, Climate Change. 2023. 44 p. DOI: 10.1093/acrefore/9780190228620.013.863.
4. Киселев А.А., Кароль И.Л. С метаном по жизни. СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2019. 73 с.
5. Thompson R.L., Lassaletta L., Patra P.K., Wilson C., Wells K.C., Gressent A., Koffi E.N., Chipperfield M.P., Winiwarter W., Davidson E.A., Tian H., Canadell J.G. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion // Nature Clim. Change. 2019. V. 9, N 12. P. 993–998. DOI: 10.1038/s41558-019-0613-7.
6. Алферов А.М., Блинов В.Г., Гитарский М.Л., Грабар В.А., Замолодчиков Д.Г., Зинченко А.В., Иванова Н.П., Ивахов В.М., Карabanю Р.Т., Карелин Д.В., Калюжный И.Л., Кашин Ф.В., Конюшков Д.Е., Коротков В.Н., Кровотынцев В.А., Лавров С.А., Марунин А.С., Парамонова Н.Н., Романовская А.А., Трунов А.А., Шилкин А.В., Юзбеков А.К. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов: Амрит, 2017. 279 с.
7. Куричева О.А., Авилов В.К., Варлагин А.В., Гитарский М.Л., Дмитриченко А.А., Дюкарев Е.А., Загирова С.В., Замолодчиков Д.Г., Зырянов В.И., Карелин Д.В., Карсанаев С.В., Курганова И.Н., Лашина Е.Д., Максимов А.П., Максимов Т.Х., Мамкин В.В., Марунин А.С., Мигловец М.Н., Михайлов О.А., Панов А.В., Прокушкин А.С., Сиденко Н.В., Шилкин А.В., Курбатова Ю.А. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RuFlux // Изв. РАН. Сер. географическая. 2023. Т. 87, № 4. С. 512–535. DOI: 10.31857/S2587556623040052.
8. Глаголев М.В. К методу «обратной задачи» для определения поверхностной плотности потока газа из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1, № 1. С. 17–36.
9. Riederer M., Serafimovich A., Foken T. Net ecosystem CO₂ exchange measurements by the closed chamber method and the eddy covariance technique and their dependence on atmospheric conditions // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 4. P. 1057–1064. DOI: 10.1038/s41558-019-0613-7.
10. Wang X., Wang C., Bond-Lamberty B. Quantifying and reducing the differences in forest CO₂-fluxes estimated by eddy covariance, biometric and chamber methods: A global synthesis // Agric. Forest Meteorol. 2017. V. 247. P. 93–103. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.07.023.
11. Pavelka P., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Brämmer C., Crill P., Darenova E., Fuß R., Gielen B., Graf A., Klemedtsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jiménez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvennoinen H., Skiba U., Vestin P., Westlien P., Janous D., Kutsch W. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O, and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems // Int. Agrophys. 2018. V. 32, N 12. P. 569–587. DOI: 10.1515/intag-2017-0045.
12. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Методы измерения газообмена на границе почва/атмосфера. Томск: ТГПУ, 2010. 96 с.
13. Курганова И.Н., Гончарова О.Ю., Ильясов Д.В., Карелин Д.В., Лопес де Гереню В.О., Матвишак Г.В., Мигловец М.Н., Мошкина Е.В., Осипов А.Ф., Хорощаев Д.А., Шарков И.Н. Методическое руководство по определению эмиссии CO₂ из почв в различных типах экосистем. Пушино: [Б.И.], 2022. 63 с.
14. Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Hagemann U., Huth V., Jordan S., Jurasinski G., Kutzbach L., Maier M., Schäfer K., Weber T., Weymann D. Best Practice Buiedeline. Measurement of carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes between soil-vegetation-systems and the atmosphere using non-steady state chambers / Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft. 2022. 70 p.
15. Задорожный А.Н., Семенов М.В., Ходжаева А.К., Семенов В.М. Почвенные процессы продукции, потребления и эмиссии парниковых газов // Агрохимия. 2010. № 10. С. 75–92.
16. Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M. Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: Current status and future needs // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 108337Z. DOI: 10.1117/12.2504388.
17. Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Ивлев Г.А. Автоматическая камера для измерения потоков парниковых газов на поверхности раздела почва–атмосфера. Патент на полезную модель № 169373 от 15 марта 2017 г.
18. Rafalska A., Walkiewicz A., Osborne B., Klumpp K., Bieganski A. Variation in methane uptake by grassland soils in the context of climate change – A review of effects and mechanisms // Sci. Total Environ. 2023. V. 871. P. 162127. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162127.
19. Schubert C.J., Wehrli B. Contribution of methane formation and methane oxidation to methane emission from freshwater systems / A. Stams, D. Sousa (eds.) // Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Springer, 2018. P. 1–31.
20. Кративин В.Ф., Шалаев В.С., Бурков Д.В. Моделирование глобальных циклов углерода и метана // Лесной вестник. 2015. № 1. С. 170–178.
21. Глаголев М.В., Смагин А.В. Количественная оценка эмиссии метана болотами: от почвенного профиля — до региона (к 15-летию исследований в Томской области) // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. № 3, вып. 3. С. 75–114.
22. Глаголев М.В., Филиппов И.В. Инвентаризации поглощения метана почвами // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2011. Т. 2, № 2. С. 1–20.
23. Ge M., Korrensalo A., Laiho R., Kohl L., Lohila A., Pihlatie M., Li X., Laine A.M., Anttila J., Putkinen A., Wang W., Koskinen M. Plant-mediated CH₄ exchange in wetlands: A review of mechanisms and measurement methods with implications for modeling // Sci. Total Environ. 2024. V. 914. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169662.
24. Potter C.S., Davidson E.A., Verchot L.V. Estimation of global biogeochemical controls and seasonality in soil methane consumption // Chemosphere. 1996. V. 32, N 11. P. 2219–2246. DOI: 10.1016/S1352-2310(97)80971-5.

25. Kammann C., Grünhage L., Jäger H.-J., Wachinger G. Methane fluxes from differentially managed grassland study plots: The important role of CH₄ oxidation in grassland with a high potential for CH₄ production // *Environ. Pollut.* 2001. V. 115, N 2. P. 261–273. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00103-8.
26. Wang F., Bettany J. Methane emission from Canadian prairie and forest soils under short term flooding conditions // *Nutr. Cycl. Agroecosystem.* 1997. V. 49, N 1. P. 197–202. DOI: 10.1023/A:1009758308457.
27. Guenet B., Gabrielle B., Chenu C., Arrouays D., Balesdent J., Bernoux M., Bruni E., Caliman J.-P., Cardinael R., Chen S., Ciais P., Desbois D., Fouché J., Frank S., Henault C., Lugato E., Naipal V., Nesme T., Obersteiner M., Zhou F. Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? // *Glob. Change Biol.* 2020. V. 27, N 2. P. 237–256. DOI: 10.1111/gcb.15342.
28. Shurpali N.J., Rannik U., Jokinen S., Lind S., Biasi C., Mammarella I., Peltola O., Pihlatie M., Hyvönen N., Raty M., Haapanala S., Zahniser M., Virkajarvi P., Vesala T., Martikainen P.J. Neglecting diurnal variations leads to uncertainties in terrestrial nitrous oxide emissions // *Nat. Sci. Report.* 2016. V. 6, N 1. Article 25739. DOI: 10.1038/srep25739.
29. Keane J.B., Morrison R., McNamara N.P., Ineson P. Real-time monitoring of greenhouse gas emissions with tall chambers reveals diurnal N₂O variation and increased emissions of CO₂ and N₂O from miscanthus following compost addition // *GCB Bioenergy.* 2019. V. 11. P. 1456–1470. DOI: 10.1111/gcbb.12653.
30. Araujo P.I., Piñeiro-Guerra J.M., Yahdjian L., Acreche M.M., Alvarez C., Alvarez C.R., Costantini A., Chalco Vera J., De Telleria J., Della Chiesa T., Lewczuk N.A., Petrasek M., Piccinetti C., Picone L., Portela S.I., Posse G., Seijo M., Videla C., Piceiro G. Drivers of N₂O emissions from natural forests and grasslands differ in space and time // *Ecosystems.* 2021. V. 24, N 2. P. 335–350. DOI: 10.1007/s10021-020-00522-7.
31. Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Фастовец И.А., Смоленцев Б.А., Ильясов Д.В., Максюттов Ш.Ш. Связь потребления метана с дыханием почв и травяно-мохового яруса в лесных экосистемах южной тайги Западной Сибири // *Почвоведение.* 2015. № 8. С. 963–973.
32. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Фофонов А.В. Потоки парниковых газов на границе «почва – атмосфера» в фоновом районе Томской области (2014 г.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 12. С. 1021–1028. DOI: 10.15372/AOO20221209; Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.C., Kozlov A.V., Fofonov A.V. Soil–atmosphere greenhouse gas fluxes in a background area in the Tomsk Region (Western Siberia) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 2. P. 152–161.
33. Краснов О.А., Maksyutov Sh., Давыдов Д.К., Фофонов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. Мониторинг эмиссии метана и двуокиси углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 7. С. 630–637. DOI: 10.15372/AOO20150707.
34. Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 4. С. 301–309. DOI: 10.15372/AOO20170407.
35. Serikova S., Pokrovsky O.S., Ala-Aho P., Kazantsev V., Kirpotin S.N., Kopysov S.G., Krickov I.V., Laudon H., Manasypov R.M., Shirokova L.S., Soulsby C., Tetzlaff D., Karlsson J. High riverine CO₂ emissions at the permafrost boundary of Western Siberia // *Nat. Geosci.* 2018. V. 11, N 11. P. 825–829. DOI: 10.1038/s41561-018-0218-1.
36. Mustamo P., Maljanen M., Hyvärinen M., Ronkanen A.-K., Kløve B. Respiration and emissions of methane and nitrous oxide from a boreal peatland complex comprising different land-use types // *Boreal Environ. Res.* 2016. V. 21, N 5–6. P. 405–426.
37. Feigenwinter I., Hortnagl L., Zeeman M.J., Eugster W., Fuchs K., Merbold L., Buchmann N. Large inter-annual variation in carbon sink strength of a permanent grassland over 16 years: Impacts of management practices and climate // *Agricult. Forest Meteorol.* 2023. V. 340. P. 109613. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109613.
38. Бобрик А.А., Рыжова И.М., Гончарова О.Ю., Мартышак Г.В., Макаров М.И., Волкер Д.А. Эмиссия CO₂ и запасы органического углерода в почвах северотаежных экосистем Западной Сибири в различных геоэкологических условиях // *Почвоведение.* 2018. № 6. С. 674–682.
39. Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // *Environ. Res. Lett.* 2011. V. 6, N 4. P. 045214. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.
40. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov S.S. Seasonal variability as a source of uncertainty in the West Siberian regional CH₄ flux upscaling // *Environ. Res. Lett.* 2014. V. 9, N 4. P. 045008. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/045008.
41. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Terentjeva I.E., Stepanenko V.M., Kotsyurbenko O.R., Maksyutov S.S., Pokrovsky O.S. Variability in methane emissions from West Siberia's shallow boreal lakes on a regional scale and its environmental controls // *Biogeosci.* 2017. V. 14, N 15. P. 3715–3742. DOI: 10.5194/bg-14-3715-2017.
42. Сабреков А.Ф., Филиппов И.В., Глаголев М.В., Терентьева И.Е., Ильясов Д.В., Кошорбенко О.Р., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана тростниковыми болотами лесостепи и подтайги Западной Сибири // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 1. С. 53–59.
43. Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia // *Boreal Environ. Res.* 2021. V. 26, N 1–6. P. 43–59.
44. Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Maksutov Sh.Sh., Fofonov A.V. Comparison of flows of greenhouse gases at the atmosphere–soil interface for three areas of the Tomsk Region // *Proc. SPIE.* 2020. V. 11560. P. 115607M. DOI: 10.1117/12.2576745.
45. Gong Y., Wu J., Vogt J., Le T.B., Yuan T. Combination of warming and vegetation composition change strengthens the environmental controls on N₂O fluxes in a boreal peatland // *Atmosphere.* 2018. V. 9, N 12. P. 480. DOI: 10.3390/atmos9120480.
46. Tangen B.A., Bansa A. Prairie wetlands as sources or sinks of nitrous oxide: Effects of land use and hydrology // *Agricult. Forest Meteorol.* 2022. V. 320. P. 108968. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108968.
47. Li J., Jin Y., Liu Y., Zhang Y., Grace J., Song Q., Sha L., Lin Y., Chen A., Li P., Fei X. Effect of precipitation exclusion on N₂O emissions in a savanna ecosystem in SW China // *Atmos. Environ.* 2018. V. 187. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.05.035.
48. Wangari E.G., Mwanake R.M., Kraus D., Werner C., Gettel G.M., Kiese R., Breuer L., Butterbach-Bahl K.,

- Houska T. Number of chamber measurement locations for accurate quantification of landscape-scale greenhouse gas fluxes: Importance of land use, seasonality, and greenhouse gas type // *J. Geophys. Res.: Biogeosci.* 2022. V. 127, N 9. P. E2022JG006901. DOI: 10.1029/2022JG006901.
49. Zou J., Tobin B., Luo Y., Osborne B. Differential responses of soil CO₂ and N₂O fluxes to experimental warming // *Agricult. Forest Meteorol.* 2018. V. 259. P. 11–22.
50. Курганова И.Н., Лонес де Гереню В.О., Мязкина Т.Н., Сапронов Д.В., Хорошаев Д.А., Аблеева В.А. Температурная чувствительность дыхания почв луговых ценозов в зоне умеренно-континентального климата: анализ данных 25-летнего мониторинга // *Почвоведение.* 2023. № 9. С. 10591076. DOI: 10.31857/S0032180X23600476.
51. Ueyama M., Takeuchi R., Takahashi Y., Ide R., Ataka M., Kosugi Y., Takahashi K., Saigusa N. Methane uptake in a temperate forest soil using continuous closed-chamber measurements // *Agricult. Forest Meteorol.* 2015. V. 213. P. 1–9. DOI: 10.2480/agrmet.D-23-00013.
52. Cai Y., Sawada K., Hirota M. Spatial variation in forest soil respiration: A systematic review of field observations at the global scale // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 874. P. 162348. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162348.
53. Brøndholt A., Larsen K.S., Ibrom A., Pilegaard K. Overestimation of closed-chamber soil CO₂ effluxes at low atmospheric turbulence // *Biogeosci.* 2017. V. 14, N 6. P. 1603–1616. DOI: 10.5194/bg-14-1603-2017.
54. Kandel T.P., Lærke P.E., Elsgaard L. Annual emissions of CO₂, CH₄, and N₂O from a temperate peat bog: Comparison of an undrained and four drained sites under permanent grass and arable crop rotations with cereals and potato // *Agricult. Forest Meteorol.* 2018. V. 256–257. P. 470–481. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.03.021.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov, A.V. Fofonov. Emission and sink of greenhouse gases in the grassland ecosystem of southern taiga of Western Siberia: estimates of the contribution of soil flux component from observations of 2023.

Modern changes in the global climate are accompanied by rising air and soil temperatures. How do they affect soil respiration and should we expect a change in greenhouse gas emissions? These questions cannot be answered without studying gas exchange between the soil and the atmosphere. In this paper, the analysis of the greenhouse gas fluxes at the soil–atmosphere interface observed at the Fonovaya Observatory in 2023 is presented. A stable CO₂ and CH₄ uptake throughout the growing season is shown. As for N₂O, on the contrary, a weak positive flux was observed. A steady uptake of carbon dioxide from the atmosphere occurred from May to mid-August; its value attained $-600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ in June and July. The methane flux (sink) attained $-0.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The nitrous oxide flux fluctuated near zero with the daily average being within $\pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. For CO₂, a nonlinear positive relationship between the increase in respiration of vegetation and soil temperature is revealed. Linear temperature dependences are found for methane fluxes in all three chambers, that is, an increase in soil temperature enhances CH₄ uptake. N₂O fluxes show very weak positive dependence on the soil temperature in both transparent chambers (with vegetation and without it). The estimates of the contribution of CO₂ fluxes from the soil showed that during nighttime, microbial respiration can contribute from 46.7 to 77.9% to the total respiration of the grassland ecosystem. On average, the share of soil methane uptake per day due to diffusion and oxidation by methanotrophs not associated with plants varies from 5.3 to 48.3%. The contribution becomes smaller during the daytime and increases at night. The contribution of soil with removed vegetation to the total N₂O emission can attain 92.3%. The results expand knowledge about soil–atmosphere gas exchange under changing climate conditions.

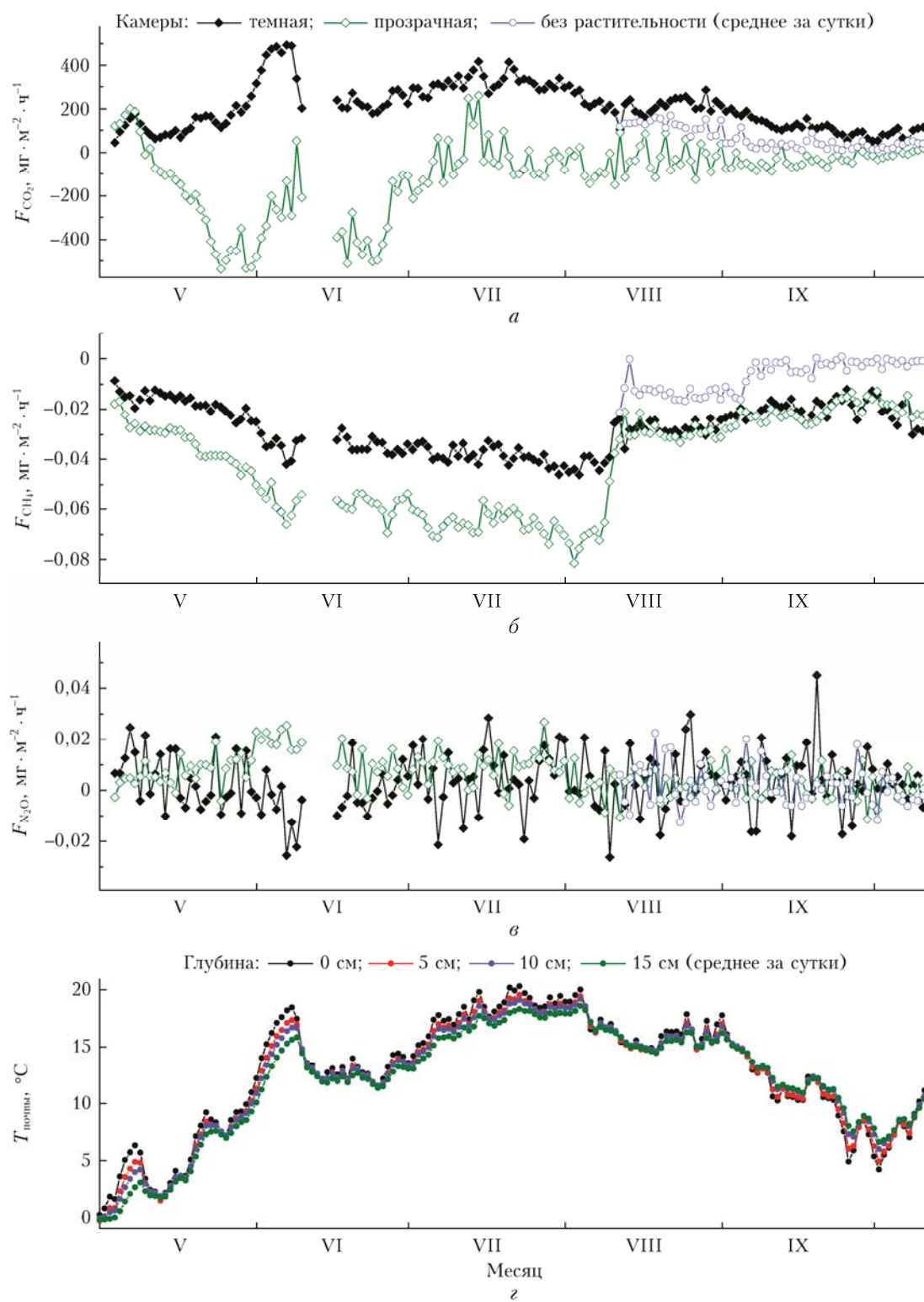


Рис. 2. Среднесуточные значения удельных потоков CO_2 (а), CH_4 (б), N_2O (в) и температуры почвы (г) в 2023 г.

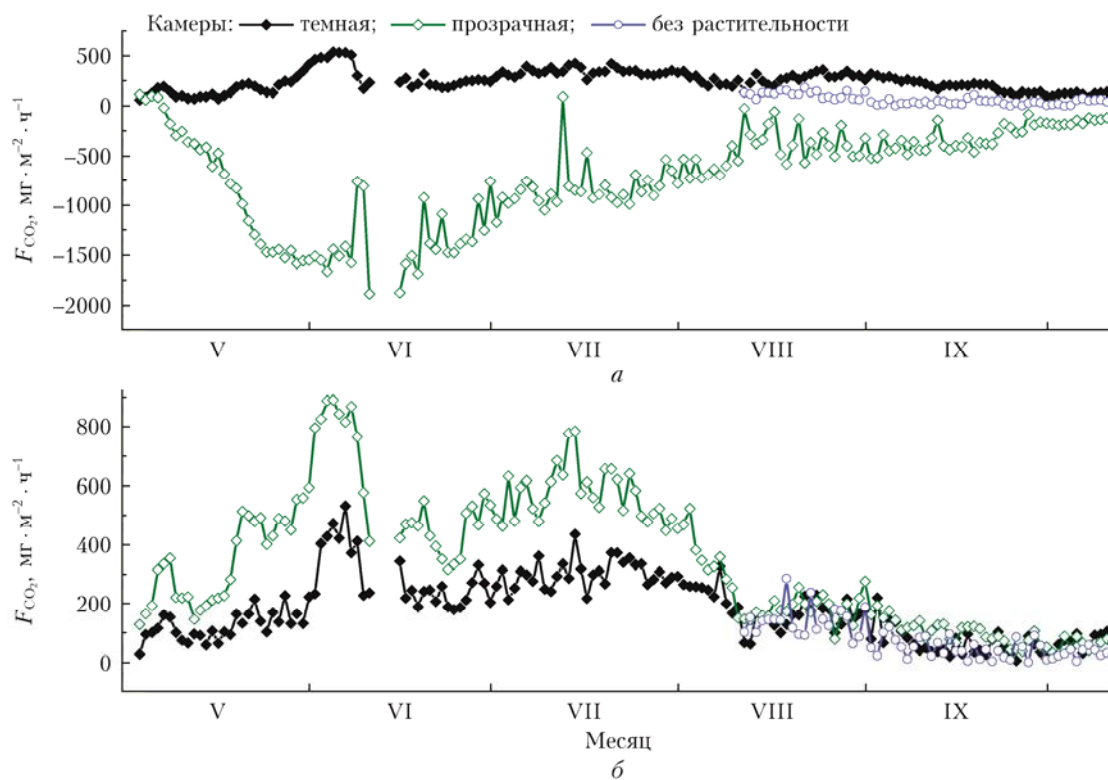


Рис. 3. Средние дневные (10:00–14:00) (*a*) и средние ночные (22:00–02:00) (*б*) значения удельных потоков CO_2 в 2023 г.

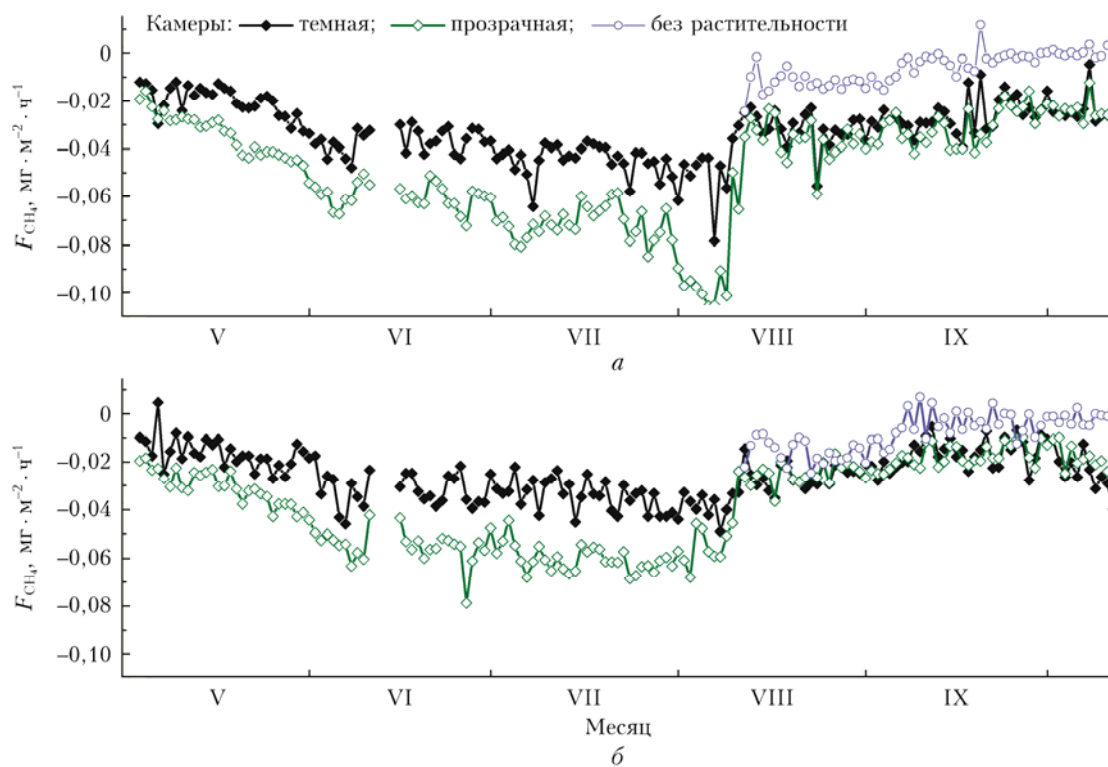


Рис. 4. Средние дневные (10:00–14:00) (*a*) и средние ночные (22:00–02:00) (*б*) значения удельных потоков CH_4 в 2023 г.

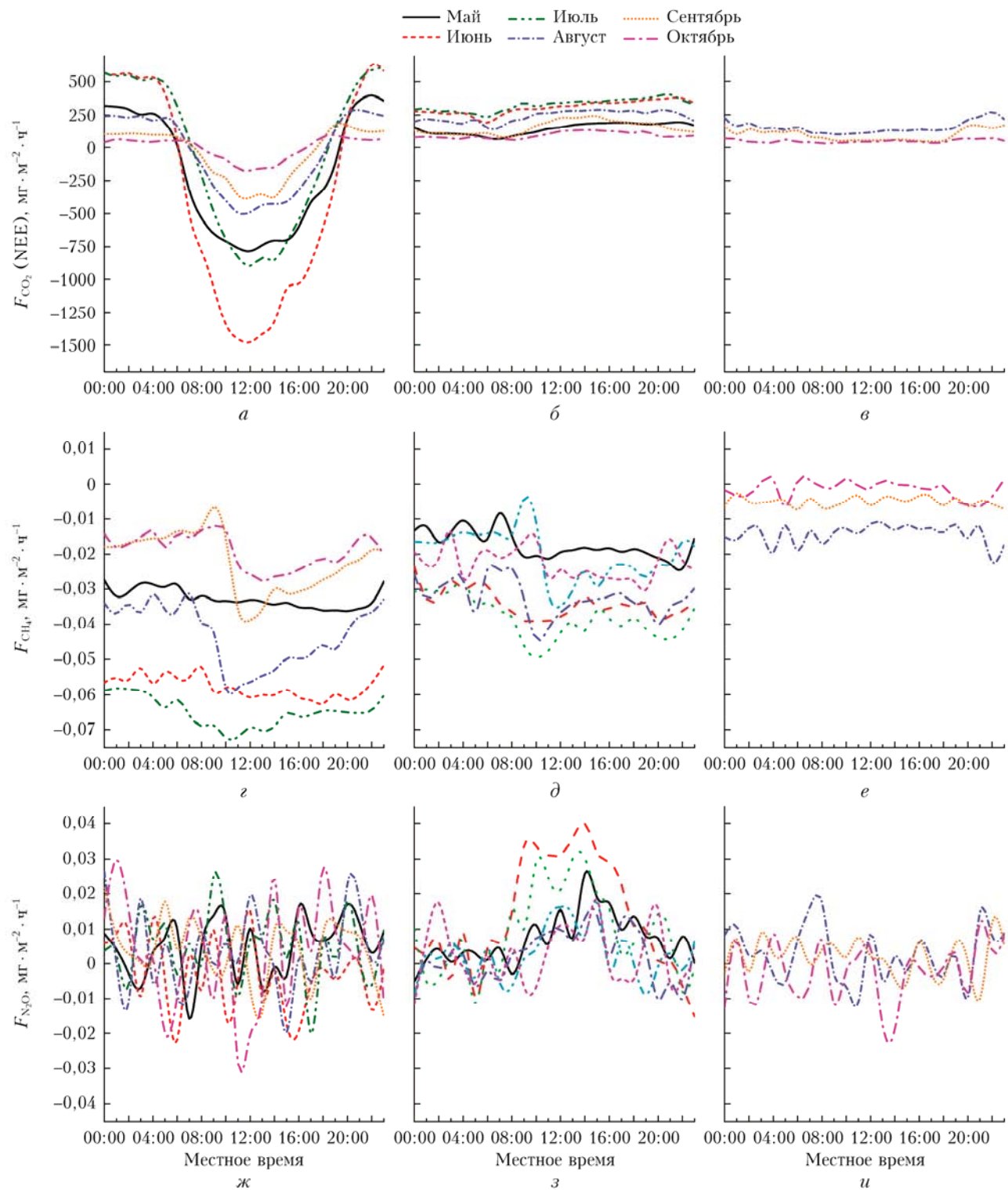


Рис. 5. Суточный ход удельных потоков CO_2 , CH_4 и N_2O , измеренных с помощью прозрачной (а, г, ж) и темной (б, д, з) камер с растительностью, а также прозрачной камерой без растительности (в, е, и) в 2023 г.

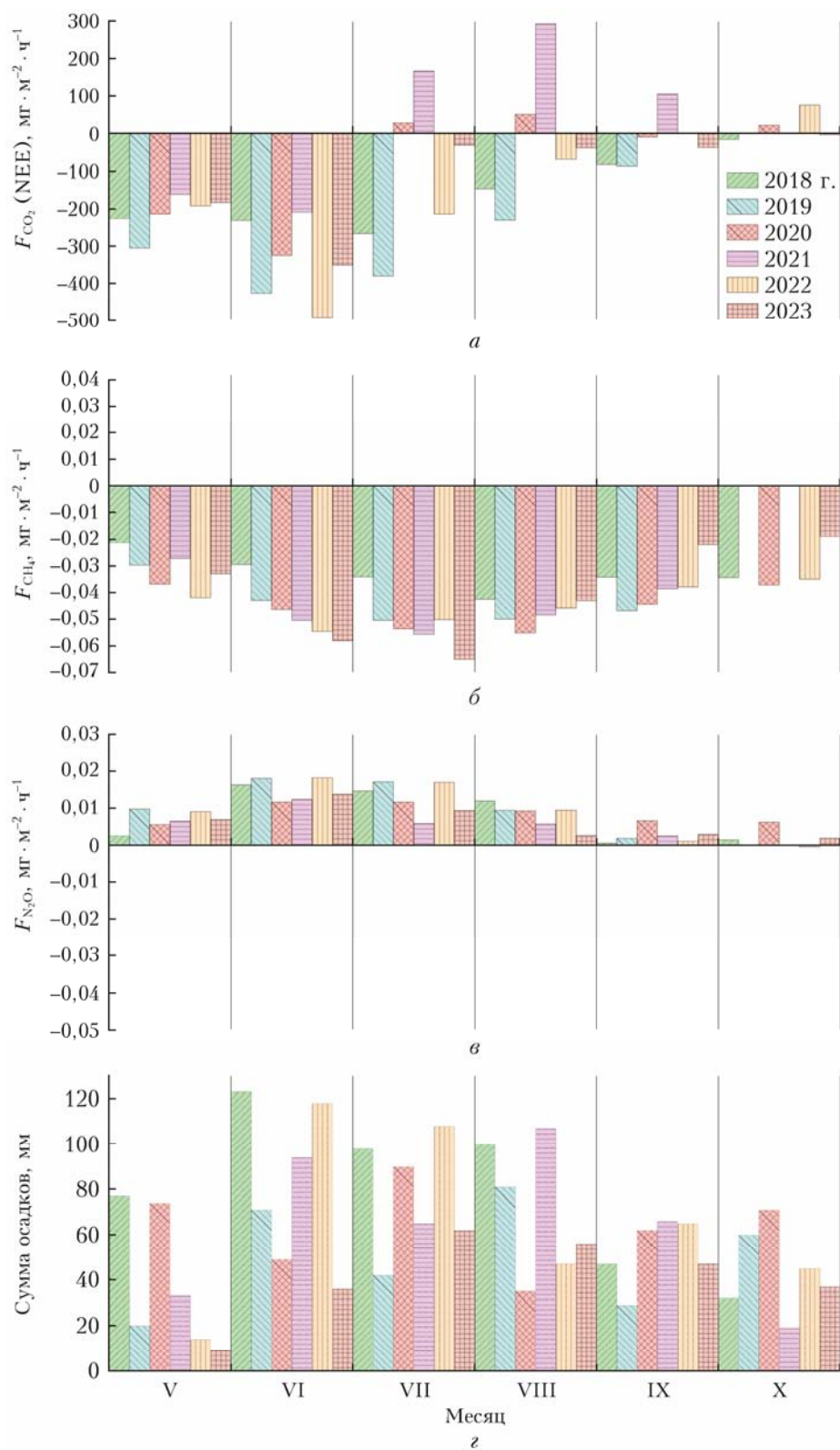


Рис. 6. Среднемесячные удельные потоки парниковых газов, измеренные с помощью прозрачной камеры на участке с растительностью (а–б), и месячные суммы осадков (г)