

Мониторинг эмиссии метана и двуокиси углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.)

О.А. Краснов¹, S. Maksyutov², Д.К. Давыдов¹,
А.В. Фофонов¹, М.В. Глаголев^{3,4,5}, G. Inoue^{6*}

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

²Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies
16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506, Japan

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, ГСП-1, Россия

⁴Югорский государственный университет
628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16, Россия

⁵Институт лесоведения РАН
143030, пос. Успенское Московской обл., ул. Советская, 21, Россия

⁶Atmosphere and Ocean Research Institute the University of Tokyo
5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 227-8564, Japan

Поступила в редакцию 4.03.2015 г.

Приводятся данные полевых измерений потоков метана и двуокиси углерода на границе раздела «почва–атмосфера» для шести характерных растительных ассоциаций на болоте в районе с. Плотниково Бакчарского района Томской области (56°51,29' с.ш., 82°50,91' в.д.) в теплое время 2014 г. Обсуждаются временные изменения температуры слоев почвы на различных глубинах в двух участках болота, отличающихся гидрологическим режимом. Описывается методика повышения точности измерения газовых потоков для автоматизированного комплекса «Flux-NIES» с использованием результатов измерений.

Ключевые слова: парниковые газы, атмосферный метан, атмосферный диоксид углерода, газообмен на границе «почва–атмосфера», автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков, температурные и гидрологические параметры почвы; greenhouse gases, atmospheric methane, atmospheric carbon dioxide, gas exchange at the “soil–atmosphere” interface, automatic complex “Flux-NIES” for flux measurements, temperature and hydrological soil parameters.

Введение

Двуокись углерода CO₂ и метан CH₄ вносят наибольший вклад в формирование парникового эффекта (60 и 20% соответственно) [1]. Важнейшим компонентом цикла углерода являются болота: с одной стороны, болотная растительность в результате фотосинтеза аккумулирует атмосферный углерод, с другой – разложение органического вещества в торфяной залежи приводит к высвобождению углерода в виде метана [2].

Основные источники CO₂ в атмосфере – выбросы вулканов, жизнедеятельность организмов, антропогенная деятельность человека, а основные

потребители – растения. Метан – наиболее важный представитель органических веществ в атмосфере. Увеличение содержания метана в атмосфере усиливает парниковый эффект, так как метан интенсивно поглощает тепловое излучение Земли в инфракрасной области спектра на длине волны 7,66 мкм. В настоящее время концентрация атмосферного метана составляет в среднем 1,8 ppm, а его общее количество в атмосфере оценивают в пределах 4600–5000 Tg (Tg = 10¹² г).

Интенсивность выделения CH₄ из болот меняется в широких пределах. К началу XXI в. считалось, что эмиссия CH₄ из сибирских болот может достигать 20 Tg/год, что довольно много в сопоставлении с общим потоком метана от болот (50–70 Tg) [3], но эта оценка базировалась всего лишь на нескольких измерениях, выполненных на ограниченном числе объектов в южной тайге и подтайге. Дальнейшие систематические исследования на всех типичных болотах во всех природных зонах Запад-

* Олег Александрович Краснов (krasnov@iao.ru); Shamil Maksyutov (shamil@nies.go.jp); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Михаил Владимирович Глаголев (m_glagolev@mail.ru); Gen Inoue.

ной Сибири (см., например, [4–7]) снизили эту оценку в 3–5 раз. Однако нужно отметить, что точность определения эмиссии CH_4 от болот затруднена большим разбросом величин при измерении даже на близко расположенных участках. Например, величина эмиссии CH_4 в западносибирских болотах колеблется в интервале от $-0,11$ до $40 \text{ мг/м}^2/\text{ч}^1$ (отрицательная эмиссия соответствует поглощению метана болотом) [3, 8].

В настоящей статье приводятся и обсуждаются результаты измерений интенсивности газообмена парниковых газов (CO_2 и CH_4) на границе «почва–атмосфера» с помощью автоматизированного комплекса «Flux-NIES» [9]. Целью данной работы было исследование временной и пространственной динамики удельных потоков CO_2 и CH_4 из естественных болот, наиболее представительных с точки зрения типичных болотных систем Западно-Сибирской низменности, общая площадь которых составляет примерно 12,9% от площади всех заболоченных почв планеты [10].

1. Описание объекта и места проведения измерений

Измерения проводились на полевом стационаре «Plotnikovo» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск) на Бакчарском болоте в Томской области с мая по октябрь 2014 г. Измерительный сайт находится примерно в 16 км от села Плотниково Бакчарского района. Координаты сайта: $56^\circ 51,29'$ с.ш., $82^\circ 50,91'$ в.д. Состав станции мониторинга «Flux-NIES» и дополнительных датчиков для измерения некоторых параметров почвы и атмосферы, а также методика проведения измерений и вычисления потоков метана и двуокиси углерода представлены в [9].

Шесть одинаковых автоматических камер из оргстекла установлены на увлажненном мезотрофном открытом кочковатом участке болота, покрытом в основном травой и мхом. На этом участке пред-

ставлен целый ряд растительных ассоциаций. Камеры были установлены на различных участках болота таким образом, чтобы тип растительности на каждом из них соответствовал характерному растительному сообществу, а именно: камера 1 – хвощево-сфагновому (*S. fallax*) мезотрофному; камера 2 – вахтосфагновому (*S. majus*) мезотрофному; камера 3 – осоково-сфагновому (*S. balticum*) олигомезотрофному; камера 4 – пушицево-осоково-сфагновому (*S. balticum*) мезоолиготрофному; камера 5 – кустарничково-осоково-сфагновому (*S. magellanicum*) мезоолиготрофному; камера 6 – сосново-кустарничково-осоково-сфагновому (*S. magellanicum*) олиготрофному сообществу [9, 11].

Монтаж станции проводился сразу после таяния снегового покрова на открытой части болота, прогревания верхнего слоя почвы и «вскрытия» осушительных каналов, которые за несколько дней отводили основную часть поверхностных талых вод в близлежащую таежную речку Икса.

2. Результаты вспомогательных измерений

Рассмотрим данные вспомогательных датчиков, которые позволяют обсудить процессы, происходящие в окружающей среде и оказывающие, согласно многочисленным литературным данным, значительное влияние на метаногенез. Известно [12–15], что метаногенез происходит в анаэробных условиях при положительных температурах почвы, поэтому прежде всего рассмотрим особенности температурного режима торфяной залежи в период проведения измерений.

На рис. 1 представлены временные профили (с 8 мая по 3 июня) температуры почвы T_{soil} на глубинах (0,05; 0,1; 0,3 м) около камеры 2 (170 м от дренажного канала), измеренные датчиками DS1921, и профиль T_{soil} (1,25 м) на глубине между камерами 3 и 4 (удаление примерно 100 м от дренажного канала) [9], полученный от датчика НОВО U20-001-04.

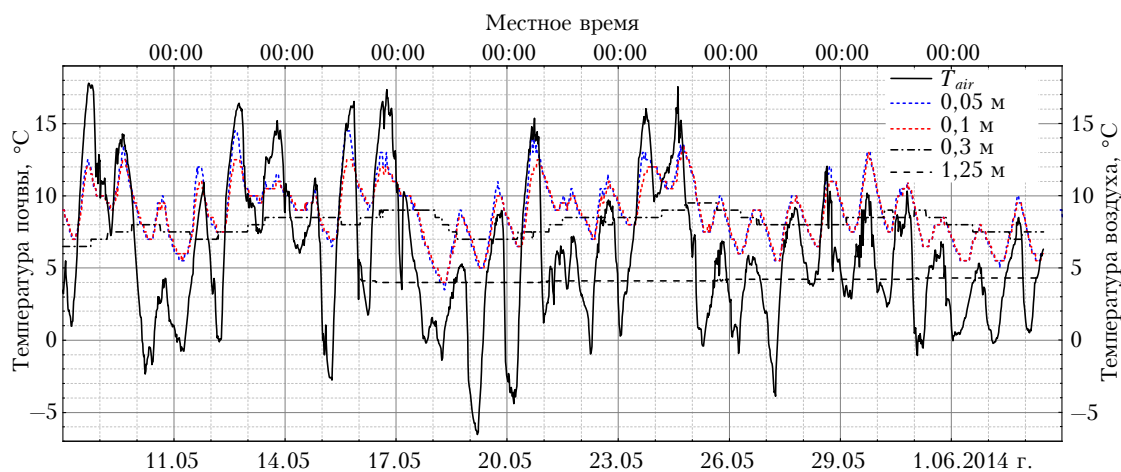


Рис. 1. Профили температуры воздуха и почвы на глубинах 0,05; 0,1; 0,3 м около камеры 2

Также изображен профиль температуры воздуха T_{air} (датчик VAISALA HMP45) на высоте 1,5 м от поверхности болота. В мае камера 2 находилась в русле ручья, стекающего из болота в канал. Назовем эту камеру «влажной». Все профили T_{soil} имеют положительные значения, а в двух верхних слоях почвы (0,05; 0,1 м) повторяют суточный ход T_{air} , хотя и имеют меньшие значения температур. В мае в дневное и сумеречное время T_{soil} (0,05 м) превышает T_{soil} (0,1 м) на 3–5 °С, а в темное время, в отсутствие радиационного прогрева почвы, температуры, как правило, сравниваются. Представляют интерес некоторые временные различия. Так, например, 8 мая T_{soil} (0,05 м) достигла локального максимума (+12,5 °С) в 16:00 и оставалась неизменной (в пределах точности датчика 0,5 °С) до 16:40, хотя в это время воздух продолжал монотонно прогреваться.

Изменения T_{soil} (0,05 м) примерно на 20 мин опережают T_{soil} (0,1 м) как при нагреве, так и при охлаждении воздуха. Профиль T_{soil} (0,3 м) имеет еще более сглаженные осцилляции, постепенно увеличиваясь от +6,5 °С 8 мая до +9,5 °С 3 июня. Практически постоянное значение ($\approx +4,15$ °С) имеет T_{soil} (1,25 м), что свидетельствует о стабильных температурных условиях на этой глубине и ниже. Убытие амплитуды колебаний температуры в почве и сдвиг их фазы при увеличении глубины достаточно хорошо объясняются в рамках классической теории теплопроводности Фурье. Как известно (см., например, [16]), амплитуда колебаний $A(x)$ экспоненциально убывает с глубиной: $A(x) = A_0 \exp(-\beta x)$, где $\beta = (0,5\omega\rho/k)^{1/2}$; A_0 и ω – соответственно амплитуда и частота колебаний на поверхности почвы; c – удельная теплоемкость; k – коэффициент теплопроводности; x – глубина; ρ – плотность. Учитывая высокую насыщенность болотной почвы водой, для грубого расчета можно взять значения c , ρ и k такими же, как у воды ($c = 4 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹; $k = 6 \cdot 10^{-1}$ Дж·с⁻¹·м⁻¹·К⁻¹; $\rho = 10^3$ кг/м³ [17]). Тогда для суточных колебаний ($\omega = 2\pi/86400 \cdot \text{с}^{-1} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$): $\beta \approx 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1}$. Отсюда видно, что если амплитуда суточных колебаний на поверхно-

сти почвы составляла, например, 20 °С, то на глубине 0,05 м $A(0,05) = 20 \exp(-1,5 \cdot 10^{-1} \cdot 0,05) \approx 9$ °С, на глубине 0,1 м $A(0,1) \approx 4$ °С, а на глубине 1,3 м $A(1,3) \approx 10^{-9}$ °С (иначе говоря, на глубине 1,3 м суточные колебания уже практически не могут быть зафиксированы).

Ниже для того же интервала времени вычислены средние величины \bar{T}_{soil} и \bar{T}_{air} с доверительными интервалами $\pm\Delta$ и доверительной вероятностью, равной 0,95, в предположении применимости распределения Стьюдента (выборка из 1909 значений):

$$\bar{T}_{soil} (0,05 \text{ м}) = (9,05 \pm 4,23) \text{ °С};$$

$$\bar{T}_{soil} (0,1 \text{ м}) = (8,83 \pm 3,8) \text{ °С};$$

$$\bar{T}_{soil} (0,3 \text{ м}) = (8,07 \pm 1,4) \text{ °С};$$

$\bar{T}_{air} = (5,99 \pm 9,58) \text{ °С}$ (минимальное значение равно –6,53 °С, максимальное – +17,8 °С).

Видно, что \bar{T}_{soil} на всех глубинах превышают \bar{T}_{air} , что также подтверждает превалирующий механизм радиационного прогрева почвы солнечным излучением.

На рис. 2 представлены аналогичные профили T_{soil} около камеры 5, установленной на моховой кочке на удалении 60 м от канала к центру болота на более сухом участке почвы (по аналогии назовем эту камеру «сухой»), и, для наглядности, профиль T_{air} . Общий характер временных изменений T_{soil} сохранился. Отметим, что в этом случае T_{soil} (0,05 м) достигает своих локальных экстремальных значений с уже гораздо большей задержкой (до 3 ч) по сравнению с T_{air} , что опять-таки объясняется малыми коэффициентами теплопроводности мха по сравнению с водой.

Величины T_{soil} на тех же глубинах примерно на 1–2 °С меньше, чем таковые для «влажной» камеры, а временная задержка T_{soil} (0,3 м) достигает уже 1,5–2 ч, что также, естественно, объясняется более низкой теплопроводностью мха. Величина T_{soil} (0,3 м) имеет практически постоянное значение (около 6,3 °С), испытывая небольшой положительный тренд и оставаясь меньше T_{soil} (0,3 м) для

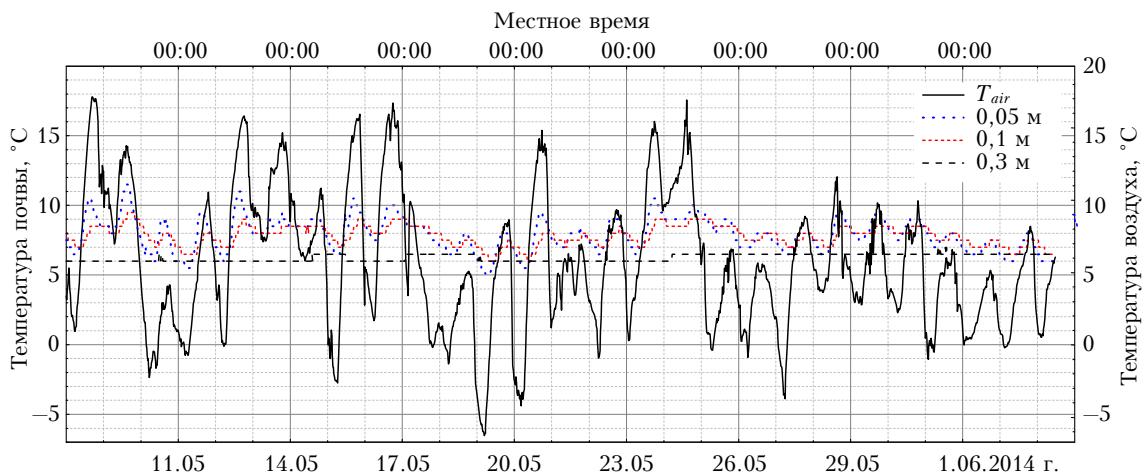


Рис. 2. Профили температуры воздуха и почвы на глубинах 0,05; 0,1; 0,3 м около камеры 5

для «влажной» камеры 2. Отмеченную задержку температурных волн, проникающих в почву, также легко объяснить на основе «второго закона Фурье» (см., например, [16]): $\delta = x[0,5c\rho/(\omega k)]^{1/2}$, где x – глубина, м; δ – время запаздывания максимумов (минимумов) температуры в почве от соответствующих моментов на поверхности. С учетом высокой насыщенности верхнего слоя мха воздухом для грубого расчета можно принять значения c , ρ и k такими же, как у воздуха ($c = 9,1 \cdot 10^2$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹; $k = 2,6 \cdot 10^{-2}$ Дж·с⁻¹·м⁻¹·К⁻¹; $\rho = 1,3$ кг/м³ [17]). Тогда для $x = 0,3$ м получим: $\delta = 0,3[0,5 \cdot 9,1 \cdot 10^2 \cdot 1,3 / (7 \cdot 10^{-5} \cdot 2,6 \cdot 10^{-2})]^{1/2} \approx 1,5$ ч. Средние значения ($\bar{T}_{soil} \pm \Delta$) с такой же доверительной вероятностью для «сухой» камеры 5:

$$\bar{T}_{soil}(0,05 \text{ м}) = (8,06 \pm 3,45) \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\bar{T}_{soil}(0,1 \text{ м}) = (7,80 \pm 1,4) \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\bar{T}_{soil}(0,3 \text{ м}) = (6,25 \pm 0,49) \text{ }^\circ\text{C}.$$

Суточные изменения T_{soil} примерно в 2 раза меньше по сравнению с предыдущим случаем «влажной» камеры, что снова объясняется меньшими коэффициентами теплообмена у мха. Также отметим, что $T_{soil}(1,25 \text{ м})$ равна 4 °С, что всего на 2 °С меньше $\bar{T}_{soil}(0,3 \text{ м})$.

На рис. 3 представлены профили T_{soil} для камеры 2 в интервале 3 июня – 20 июня. Обратим внимание, что в этой закладке датчики T_{soil} были установлены на других глубинах (0,05, 0,2 и 0,4 м). Здесь же представлены профили $T_{soil}(1,25 \text{ м})$ и T_{air} и, кроме того, профиль уровня грунтовых вод WL (мм) (датчик PDCR-1830, установленный на глубине 1,0 м между камерами 3 и 4). Показания датчика WL появились только после 14 июня (18:00) (причина в том, что до этого времени датчик находился в мерзлой почве). По этим показаниям уровень воды превышал уровень почвы на 31 мм (WL = 1031 мм), который со временем постепенно снижался. Также приведен профиль интенсивности осадков Rain (мм) (левая шкала); значения для наглядности увеличены в 10 раз) с датчика YONG model 52203. Видно, что, хотя осадков после 14 июня не было, уровень WL менялся хаотично при общем тренде уменьшения со временем.

При наличии осадков температура почвы увеличивалась. Положительный временной тренд как T_{air} , так и T_{soil} начинается только после 9 июня. Можно отметить, что, несмотря на отрицательные T_{air} утром 7 и 8 июня, T_{soil} при этом не опускается ниже нуля. Также заметим, что практически отсутствует задержка во времени между суточными изменениями $T_{soil}(0,05 \text{ м})$ и T_{air} , что свидетельствует о прогревании поверхностного слоя почвы. Задержка же в соседних локальных экстремальных значениях T_{soil} на глубинах 0,05 и 0,2 м может достигать уже нескольких (до шести) часов.

$T_{soil}(1,25 \text{ м})$ практически не меняется, что опять-таки означает отсутствие влияния прогрева верхних слоев почвы на более глубокие (от 1 м и ниже). Только после 18 июня наблюдается небольшой отрицательный тренд T_{air} и T_{soil} на двух верхних (0,05 и 0,2 м) уровнях, при этом $T_{soil}(0,4 \text{ м})$, по-прежнему, монотонно возрастает, что также можно объяснить в рамках теории теплопроводности Фурье.

Как было показано выше, амплитуда быстрых (суточных) колебаний температуры в торфе, насыщенном водой, резко убывает (на глубине 0,4 м она составит лишь 0,2% от амплитуды суточных колебаний на поверхности). Тогда амплитуда годовых колебаний будет убывать гораздо слабее, так как частота этих колебаний заметно меньше: $\omega = 2\pi / (3600 \cdot 24 \cdot 365) \text{ с}^{-1} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. Это приведет к уменьшению величины $\beta \approx 8,2 \cdot 10^{-1} \text{ м}^{-1}$. Отсюда видно, что если амплитуда годовых колебаний на поверхности почвы составляла, например, 19 °С, то на глубине 0,4 м $A(0,4) = 19 \exp(-0,82 \cdot 0,4) \approx 14$ °С. Тогда запаздывание составит $\delta \approx 1,6 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 19$ сут.

Таким образом, монотонное возрастание температуры в почве на глубине 0,4 м отражает увеличение средней температуры воздуха, имевшее место 19 сут назад. И если бы наблюдавшийся после 18 июня небольшой отрицательный тренд T_{air} продержался еще дольше, то примерно через 19 сут температурная волна дошла бы до глубины 0,4 м, в связи с чем температура там тоже стала бы понижаться.

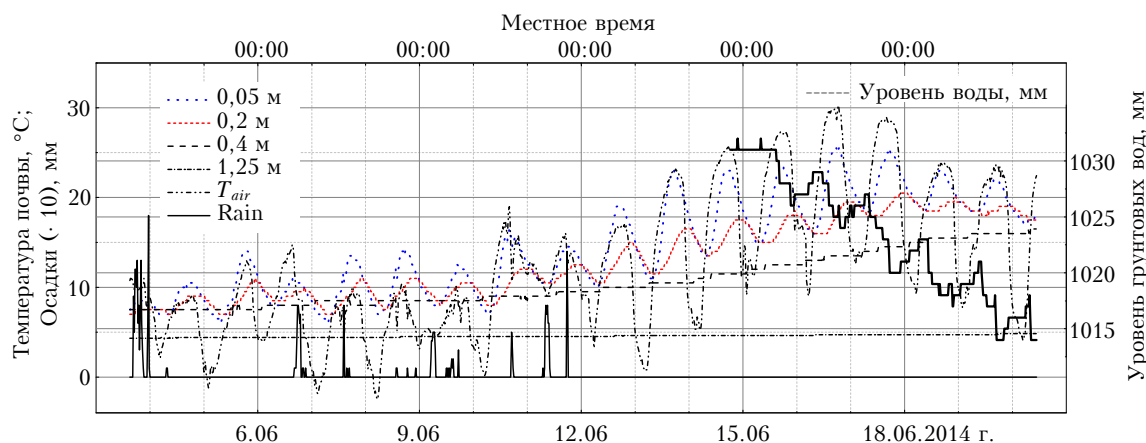


Рис. 3. Профили температуры почвы на глубинах 0,05; 0,2; 0,4 м, интенсивность осадков и уровень грунтовых вод около камеры 2

Подобные профили температуры почвы были получены с середины мая до середины октября. Глубина размещения датчиков T_{soil} менялась через раз и составляла в первой закладке 0,05, 0,1 и 0,3 м, а во второй – 0,05, 0,2 и 0,4 м. В целях экономии места здесь приводятся только средние значения для каждого отдельного интервала измерений с учетом места и глубины размещения датчиков (табл. 1). Также приведены \bar{T}_{air} и ее минимальное и максимальное значения, а в последнем столбце – уровень грунтовых вод WL в начале и конце каждого временного интервала. Эта информация представляет интерес с точки зрения обсуждения эффективной глубины метаногенеза.

На рис. 4 приведен профиль T_{soil} (1,25 м) за весь период измерений с 16 мая по 29 октября. Видно, что на этой глубине почва равномерно прогревалась (градиент $+0,0267\text{ }^\circ\text{C}/24\text{ ч}$) с начала мая до 9 сентября (с 4,0 до 7,9 $^\circ\text{C}$) и затем с 19 сентября началось постепенное уменьшение температуры (градиент $-0,05\text{ }^\circ\text{C}/24\text{ ч}$) до 28 октября, когда T_{soil} (1,25 м) упала до $+6,27\text{ }^\circ\text{C}$.

Количественная интерпретация такой динамики температуры также возможна из теории тепло-

проводности Фурье. Для глубины 1,25 м: $A(1,25) = 19\exp(-0,82 \cdot 1,25) \approx 5,6\text{ }^\circ\text{C}$. Такое возрастание температуры должно занять $1/4$ года (т.е. $365/4 \approx 91,25$ сут). Из графика видно, что его можно разбить на две части: в течение 116 сут (с 16 мая по 9 сентября) температура возрастала, а потом в течение 48 сут она падала. Следовательно, учитывая, что начальное значение температуры составляло $4,0\text{ }^\circ\text{C}$, ее конечное значение можно приблизительно оценить следующим образом: $(4,0 + 5,6 \cdot 116 \cdot 4/365 - 5,6 \cdot 48 \cdot 4/365) \approx 8,1\text{ }^\circ\text{C}$.

Как видим, эта крайне приближенная оценка лишь на $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ отличается от истинного значения (и это при том, что мы использовали очень примерные оценки теплофизических свойств среды).

Таким образом, для глубины 1,25 м имеем запаздывание годовой температурной волны:

$$\delta = 1,25[0,5 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 10^3 / (2 \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^{-1})]^{1/2} \approx 6,1 \cdot 10^6 \text{ с} \approx 71 \text{ сут},$$

а наблюдаемое уменьшение (после 19 сентября) T_{soil} (1,25 м) отражает спад средней температуры атмосферы, начавшийся примерно 2 мес назад (см. табл. 1).

Таблица 1

Средние значения и доверительные интервалы ($\bar{T}_{soil} \pm \Delta$) для отдельных серий измерений с учетом места (камера 2/камера 5) и глубины размещения датчиков, а также $\bar{T}_{air} \pm \Delta$ (min и max значения) и WL

Период и число измерений	\bar{T}_{soil} (0,05 м), $^\circ\text{C}$	\bar{T}_{soil} (0,1 м), $^\circ\text{C}$	\bar{T}_{soil} (0,2 м), $^\circ\text{C}$	\bar{T}_{soil} (0,3 м), $^\circ\text{C}$	\bar{T}_{soil} (0,4 м), $^\circ\text{C}$	\bar{T}_{soil} (1,25 м), $^\circ\text{C}$	\bar{T}_{air} , $^\circ\text{C}$ min; max	WL, мм
8.05–3.06 $n = 1909$	$9,1 \pm 4,2$ $8,1 \pm 3,5$	$8,8 \pm 3,8$ $7,8 \pm 1,4$	нет данных	$8,07 \pm 1,4$ $6,3 \pm 0,5$	нет данных	$4,15 \pm 0,22$	$6,0 \pm 9,58$ $-6,5; +17,8$	нет данных
3.06–20.06 $n = 1213$	$14,5 \pm 10,5$ $12,2 \pm 7,74$	нет данных	$12,9 \pm 8,3$ $9,65 \pm 5,2$	нет данных	$10,6 \pm 5,6$ $7,52 \pm 2,65$	$4,57 \pm 0,27$	$12,5 \pm 15,3$ $-2,5; +30,3$	1031–1015 14.06–20.06
20.06–15.07 $n = 1792$	$19,2 \pm 5,82$ $18,8 \pm 5,6$	$19,46 \pm 2,9$ $18,4 \pm 2,6$	нет данных	$18,05 \pm 1,4$ $14,6 \pm 2,2$	нет данных	$5,35 \pm 0,65$	$19,94 \pm 13,3$ $+3,44; +34,27$	1016–947
15.07–8.08 $n = 1716$	$17,1 \pm 4,6$ $16,7 \pm 4,4$	нет данных	$16,6 \pm 4,6$ $15,8 \pm 2,4$	нет данных	$16,7 \pm 1,84$ $14,4 \pm 0,76$	$6,42 \pm 0,54$	$15,19 \pm 12,7$ $+0,64; +29,3$	946–908
8.08–28.08 $n = 1433$	$16,6 \pm 4,96$ $16,3 \pm 5,0$	$16,48 \pm 3,4$ $16,5 \pm 3,4$	нет данных	$16,03 \pm 1,6$ $14,86 \pm 1,0$	нет данных	$7,16 \pm 0,37$	$16,2 \pm 11,76$ $+0,43; +29,06$	908–915
28.08–23.09 $n = 1862$	$8,3 \pm 4,9$ $16,3 \pm 4,98$	нет данных	$9,62 \pm 3,68$ $16,47 \pm 3,4$	нет данных	$11,2 \pm 3,39$ $14,9 \pm 0,96$	$7,79 \pm 0,19$	$6,68 \pm 10,5$ $-7,78; +20,7$	915–924
30.09–28.10 $n = 2036$	$1,0 \pm 3,53$ $1,61 \pm 4,02$	$1,5 \pm 3,21$ $2,36 \pm 3,61$	нет данных	$3,43 \pm 2,72$ $4,22 \pm 2,76$	нет данных	$6,86 \pm 0,74$	$1,92 \pm 8,3$ $+7,04; +13,01$	924–932 23.09–12.10

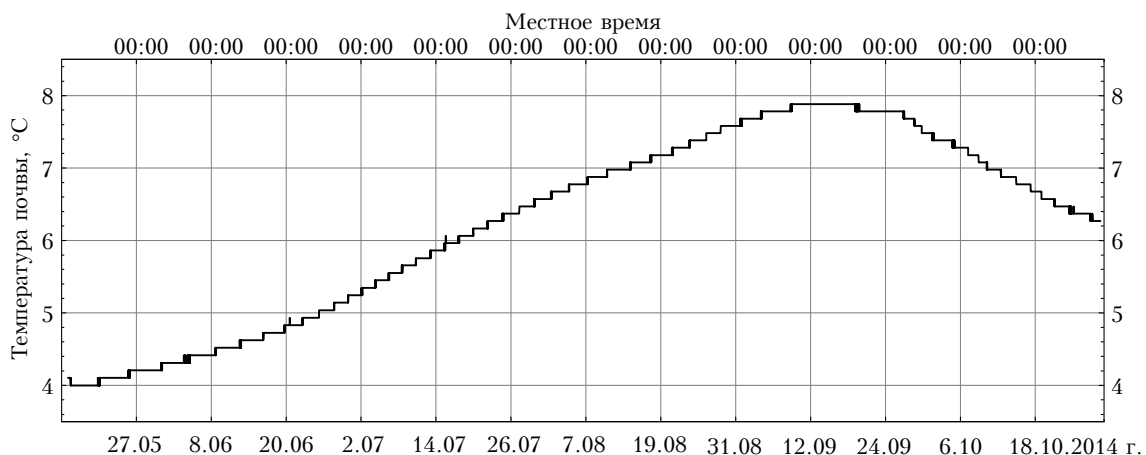


Рис. 4. Профиль T_{soil} (1,25 м) за весь период измерений

3. Методика учета влияния внешних факторов для увеличения точности измерения потоков газов комплексом «Flux-NIES»

Методика проведения измерений и вычисления потоков представлена ранее в работе [9]. В 2014 г. методика обработки данных измерений была модернизирована в части увеличения точности вычисления коэффициентов калибровки. Для определения чувствительности газоанализаторов в измерительном комплексе «Flux-NIES» дважды в сутки (в 03:40 и 15:40) проводится процедура калибровки по стандартным газовым смесям. Концентрации газовых смесей в двух баллонах (в нейтральной среде чистого сухого синтетического воздуха) выбраны таким образом, что в первом баллоне смесь CH_4 (3,26 ppm) и CO_2 (318,0 ppm) сопоставима с концентрациями атмосферных фоновых значений, а во втором — смесь тех же газов, но с концентрациями, заведомо превышающими наибольшие концентрации этих газов в рабочей (закрытой) камере, а именно 9,84 и 612,0 ppm соответственно. По измеренной разности сигналов определяется текущее значение коэффициента калибровки $S(t_k)$ (ppm/мВ), которое в идеале должно быть постоянно. Однако анализ циклов калибровки (в течение всего периода измерений) показал, что полученные значения $S(t_k)$ для измеряемых газов непостоянны и зависят от окружающих условий и поэтому возможна их дополнительная коррекция.

Для CO_2 найдена значимая корреляция R с атмосферным давлением Press (рис. 5). На измерения CH_4 в большей степени влияют изменения потока воздуха из камеры Flow (рис. 6), который, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды Temp .

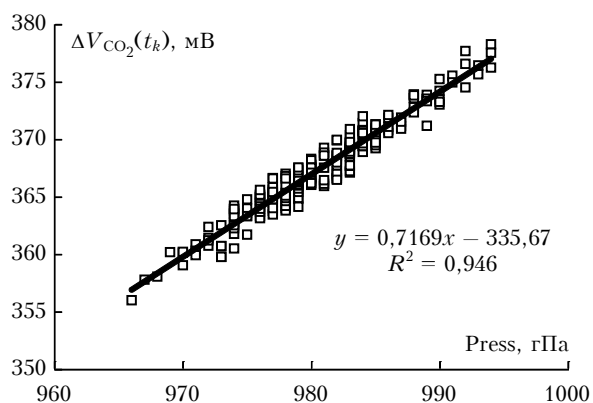


Рис. 5. Зависимость потоков CO_2 от атмосферного давления

Причина в том, что регулировка Flow производится механическим игольчатым клапаном, нагрев или остывание которого, в соответствии с температурным режимом, приводят к изменениям потока. Таким образом, чем выше температура окружающей среды, тем меньше скорость потока.

Для уменьшения вариативности $S(t_k)$ результаты измерений были скорректированы с использованием найденных зависимостей по следующим эмпирическим формулам:

$$S_{\text{CO}_2}(t_k) = \Delta C_{\text{CO}_2} / (\Delta V_{\text{CO}_2}(t_k) + 0,75(984 - \text{Press}(t_k))),$$

$$S_{\text{CH}_4}(t_k) = \Delta C_{\text{CH}_4} / (\Delta V_{\text{CH}_4}(t_k) + 3,0(780 - \text{Flow}(t_k))),$$

где ΔC_{CO_2} и ΔC_{CH_4} — разности концентраций в стандартных газовых смесях. В наших измерениях 2014 г. они составляли 294,0 и 6,580 ppm соответственно.

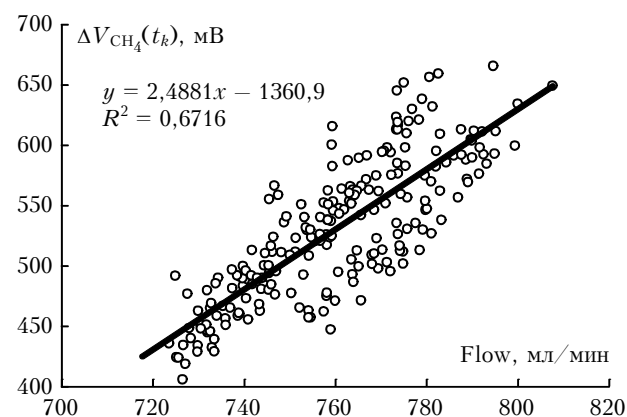


Рис. 6. Зависимость потоков CH_4 от скорости воздушного потока из камеры

На рис. 7 и 8 показано, как уменьшилась изменчивость коэффициентов $S(t_k)$ после проведения коррекции.

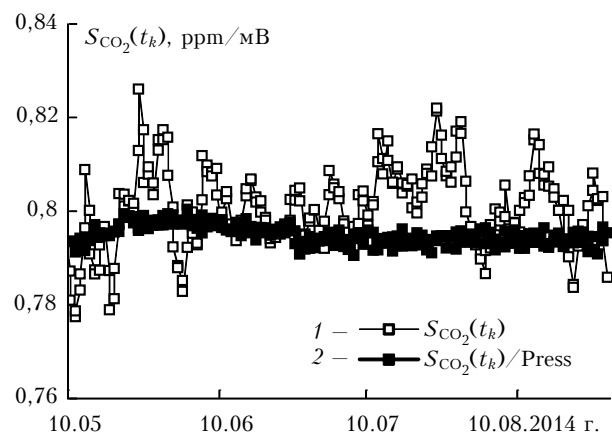


Рис. 7. Изменчивость коэффициентов $S_{\text{CO}_2}(t_k)$: 1 — до, 2 — после проведения коррекции

Полученное изменение чувствительности газоанализатора для CO_2 укладывается в 0,01 ppm/мВ. Для CH_4 удалось снизить вариативность чувствительности до 2–3 ppb/мВ, особенно в середине лета. Подбирая корректирующие коэффициенты для различных временных периодов, можно добиться и лучших показателей, но этот вопрос требует дальнейшей проработки.

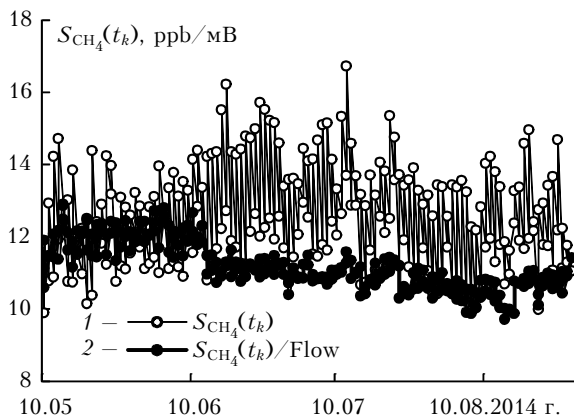


Рис. 8. Изменчивость коэффициентов $S_{CH_4}(t_k)$: 1 – до, 2 – после проведения коррекции

Таким образом, чтобы учесть влияние окружающих условий, при определении газовых потоков нужно использовать следующие уточняющие формулы:

$$F_{CO_2}(t) = S_{CO_2}(t_k)d_{CO_2}(t)/dt \times (1 + 0,75(984 - Press(t))/d_{CO_2}(t_k)),$$

$$F_{CH_4}(t) = S_{CH_4}(t_k)d_{CH_4}(t)/dt \times (1 + 3,0(780 - Flow(t))/d_{CH_4}(t_k)).$$

И, следовательно, применять не только более точные значения калибровочных коэффициентов газоанализаторов, но и те же поправки к разностям сигналов $d_{CO_2}(t)$ и $d_{CH_4}(t)$ на текущие значения $Press$ и $Flow$. Если $Press$ и $Flow$ между процедурами калибровки меняются значительно, то для более точного определения потоков, начиная с некоторого момента, можно использовать коэффициенты, полученные в следующем калибровочном цикле. Тогда формулы расчета будут выглядеть следующим образом:

$$F_{CO_2}(t) = S_{CO_2}(t_{k+1})d_{CO_2}(t)/dt \times (1 + 0,75(984 - Press(t))/d_{CO_2}(t_{k+1})),$$

$$F_{CH_4}(t) = S_{CH_4}(t_{k+1})d_{CH_4}(t)/dt \times (1 + 3,0(780 - Flow(t))/d_{CH_4}(t_{k+1})),$$

где t_{k+1} – время следующей калибровки.

4. Измерение потоков CH_4 и CO_2

Прежде всего следует отметить трудоемкость обработки данных полевых наблюдений. Фактически ни одно значение скорости эмиссии/стока $d_{CO_2}(t)/dt$ и $d_{CH_4}(t)/dt$ не получается автоматически, так как наблюдается временной дрейф чувствительности газоанализаторов как в течение одних суток, так и в период всего летнего сезона. Кроме того, ночные измерения зачастую искажаются образованием в приземном слое атмосферы над поверхностью почвы инверсного слоя с высокими концентрациями исследуемых газов, когда проветривание открытых камер окружающим атмосферным воздухом крайне затруднено. При этом наблюдаются значительные «скачки» так называемой «базовой линии» сигнала газоанализаторов, от которой ведется отсчет сигналов при измерении потоков. Как правило, такие измерения приходилось исключать из общего массива данных, используемых для обработки.

На рис. 9 представлены профили (за одни сутки 10 мая) величины интегрального потока падающей солнечной радиации в видимом диапазоне Solar ($Вт/м^2$, правая шкала) и потоков CO_2 (левая шкала, дискретные точки) из всех шести камер. Точки сдвинуты относительно друг друга на 20 мин соответственно времени последовательного включения камер в измерения [9].

Заметим, что положительные величины потоков CO_2 означают «дыхание» растений в темное время суток (эмиссия газа из почвы) в отсутствие солнечной радиации; отрицательные (поглощение газа) – «сток» CO_2 из атмосферы как результат фотосинтеза растений. Если учесть, что «дыхание» растений присутствует круглосуточно, то величины

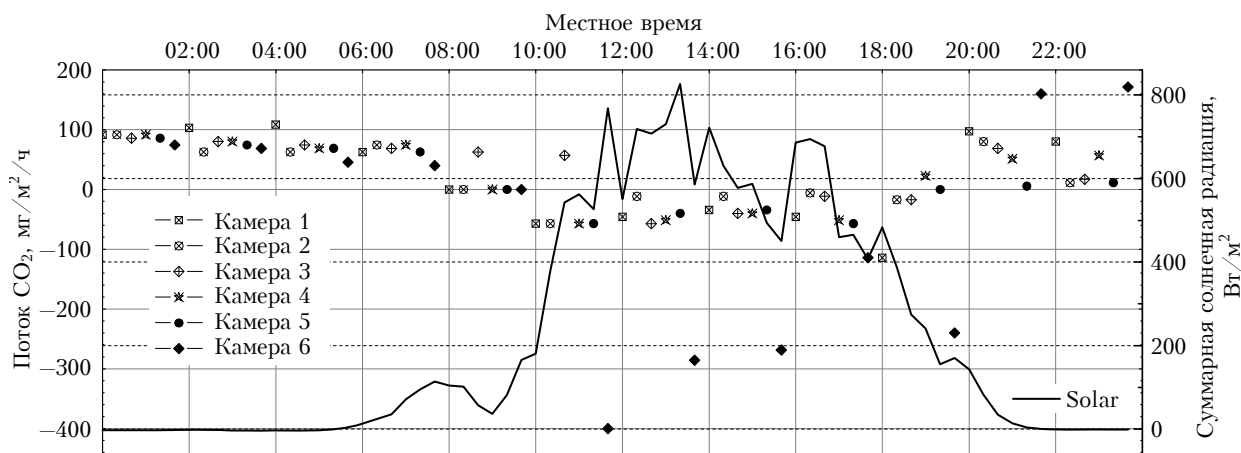


Рис. 9. Профили величины интегрального потока падающей солнечной радиации Solar и потока CO_2 , полученные 10 мая

потоков в светлое время представляют собой суперпозицию «дыхания» и «стока». Видно, что в середине мая наибольшие величины потоков CO_2 соответствуют камере 6 ($-400 \text{ мг/м}^2/\text{ч}$) в дневное время при уровне Solar порядка $700\text{--}810 \text{ Вт/м}^2$.

Для остальных камер фотосинтез еще незначителен и поэтому потоки CO_2 не превышают $60 \text{ мг/м}^2/\text{ч}$ по абсолютной величине, т.е. «сток» всего в 2 раза больше «дыхания». Заметим, что восточнее камеры 6 растут небольшие деревья высотой 2–3 м и примерно до 10 ч тень от крон деревьев ограничивает поток солнечной радиации, а следовательно, уменьшает фотосинтез. Для такой характеристики, как «дыхание» (в темное время), характерные величины потоков равны $100\text{--}160 \text{ мг/м}^2/\text{ч}$. Небольшое увеличение потоков CO_2 из 5-й и 6-й камер примерно с 17:40 до 19:40 могло быть вызвано наличием локальных кучевых облаков, тень от которых в это время не падала на камеры, и при этом облака не оказывали значительного влияния на естественное уменьшение потока Solar вечером. По характеру профиля Solar можно судить о наличии в этот день разорванной облачности.

На рис. 10 представлены аналогичные профили потоков CO_2 и Solar, полученные 4 июня (с 00:00

до 22:00). В этот день потоки Solar составляли в среднем $400\text{--}450 \text{ Вт/м}^2$, что указывает на наличие облачности, уменьшающей процесс фотосинтеза. Из сравнения рис. 9 и 10 можно судить о динамике потоков CO_2 (связанных с ростом биомассы растений) через 26 дней. Видно, что величины потоков заметно возросли по сравнению с потоками 10 мая (несмотря на двукратно меньшие потоки Solar) и определяются типом растительности. Значимые потоки в светлое время («сток» CO_2) наблюдаются уже не только в камере 6, но и в камерах 1 и 4. Можно также отметить слабые потоки в камере 3, которая практически не участвовала в газообмене. Внутри этой камеры наблюдалась слабая «угнетенная» растительность. Позже (28 августа) эта камера будет переставлена на 2 м в сторону на том же участке почвы.

На рис. 11 представлены профили потоков CO_2 и Solar, полученные 16–17 июля. Можно опять отметить наличие разорванной облачности («изрезанность» профиля Solar) днем, когда величины Solar достигали 820 Вт/м^2 . В светлое время CO_2 -потоки значительно возросли по сравнению с предыдущими до -1590 для камеры 1; -1270 для камеры 6; -990 для камеры 2 и до $-845 \text{ мг/м}^2/\text{ч}$ для камеры 4.

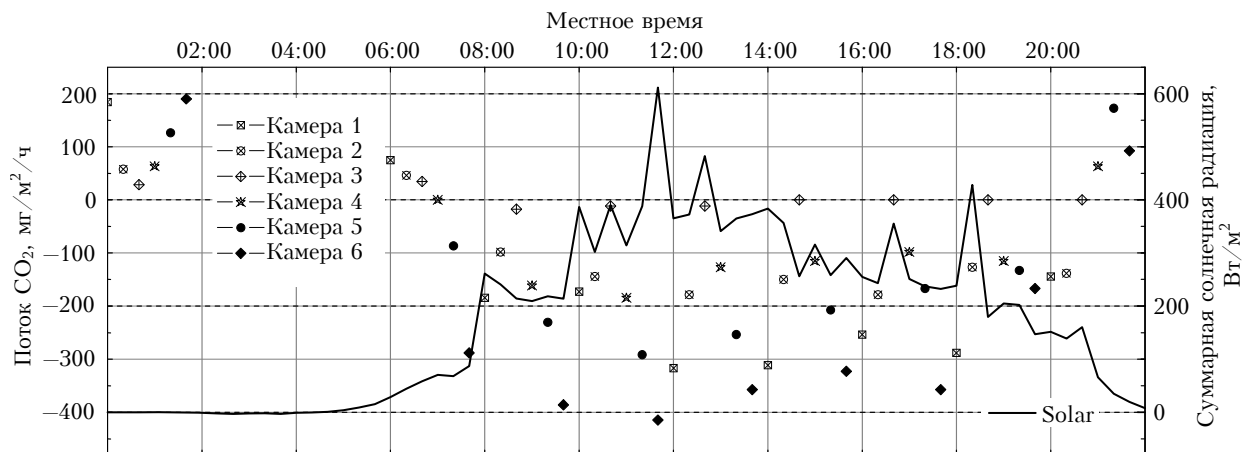


Рис. 10. Профили величины интегрального потока падающей солнечной радиации Solar и потока CO_2 , полученные 4 июня

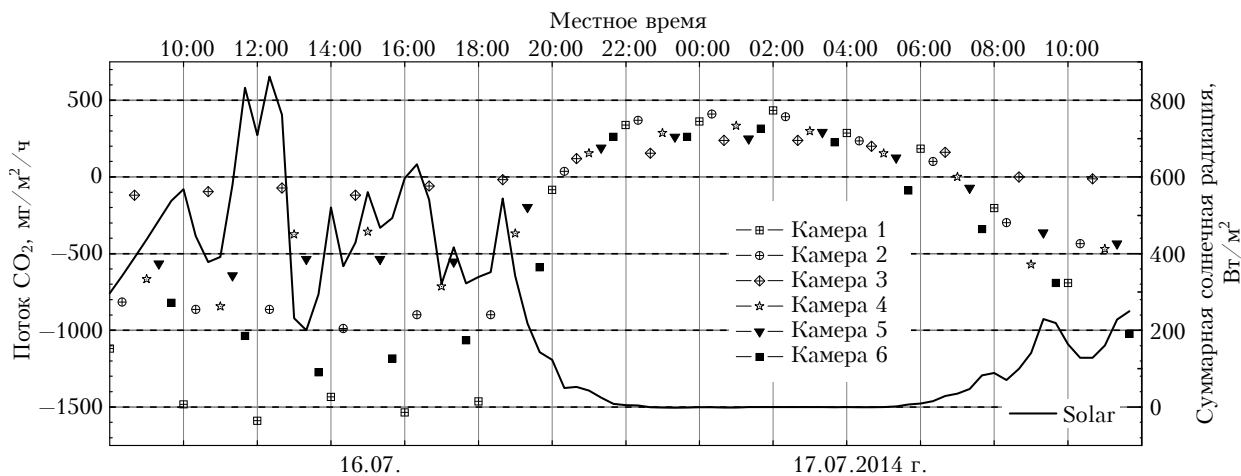


Рис. 11. Профили величины интегрального потока падающей солнечной радиации Solar и потока CO_2 , полученные 16–17 июля

В табл. 2 приведены интегральные значения баланса C_{CO_2} ($г/м^2$) за весь период измерений (143 сут) для каждой камеры в отдельности (а фактически для каждой из шести выбранных растительных ассоциаций). Видно, что интегральный бюджет углерода свидетельствует об интенсивном поглощении его подстилающей поверхностью в течение всего теплого времени года.

Можно отметить зависимость потоков от характера растительности, толщины торфяной залежи

и температурно-влажностного режима в выбранных точках наблюдения.

В табл. 3 приведены статистически обеспеченные потоки метана в периоды устойчивой работы газоанализатора в 2014 г. Особенно отметим, что для исследуемых экосистем характерна только эмиссия CH_4 в любое время суток.

На рис. 12 приведены вычисленные дневные потоки F_{CH_4} и F_{CO_2} ($мг/м^2/ч$) для каждой из шести камер в отдельные дни по всему периоду измерений,

Таблица 2

Интегральные значения баланса C_{CO_2} за весь период измерений

Баланс C_{CO_2}	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4	Камера 5	Камера 6
$C_{CO_2}, г/м^2$	-53,340	-27,900	-1,800	-16,600	-17,400	-44,600

Таблица 3

Статистически обеспеченные потоки метана F_{CH_4} ($мг/м^2/ч$)

Дата	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4	Камера 5	Камера 6
9.05	$22,9 \pm 1,05$	$5,88 \pm 2,44$	$0,5 \pm 1,35$	$13,35 \pm 2,35$	$5,34 \pm 2,48$	$1,24 \pm 2,00$
10.05	$23,5 \pm 2,75$	$7,4 \pm 3,83$	$0,68 \pm 1,23$	$12,5 \pm 2,68$	$6,38 \pm 4,28$	$1,01 \pm 1,13$
14.05	$22,76 \pm 2,18$	$8,34 \pm 1,34$	$1,46 \pm 1,24$	$14,31 \pm 2,93$	$6,84 \pm 4,3$	$1,15 \pm 1,08$
29.05	$23,9 \pm 2,9$	$14,8 \pm 3,4$	$2,2 \pm 1,17$	$19,4 \pm 8,2$	$14,0 \pm 2,5$	$1,41 \pm 1,49$
4.06	$25,8 \pm 0,98$	$18,6 \pm 3,3$	$2,3 \pm 1,1$	$20,93 \pm 2,15$	$14,7 \pm 4,23$	$1,88 \pm 1,03$
5.06	$25,78 \pm 3,06$	$20,14 \pm 3,06$	$2,4 \pm 1,2$	$20,52 \pm 2,15$	$16,06 \pm 5,3$	$2,24 \pm 1,35$
15.06	$24,13 \pm 3,89$	$27,15 \pm 7,39$	$5,52 \pm 2,32$	$26,1 \pm 7,1$	$23,6 \pm 3,67$	$3,98 \pm 1,76$
4.07	$47,26 \pm 8,0$	$38,52 \pm 13,0$	$14,1 \pm 4,93$	$37,27 \pm 7,73$	$23,21 \pm 5,73$	$12,52 \pm 9,7$
15.07	$52,26 \pm 6,08$	$52,23 \pm 9,2$	$14,32 \pm 3,05$	$43,35 \pm 10,4$	$38,34 \pm 6,9$	$12,11 \pm 6,68$
16.07	$52,86 \pm 4,5$	$53,87 \pm 8,7$	$13,84 \pm 4,9$	$42,8 \pm 4,6$	$34,65 \pm 2,69$	$9,91 \pm 3,7$
2.08	$44,35 \pm 6,38$	$47,04 \pm 7,37$	$7,96 \pm 2,1$	$38,07 \pm 4,38$	$33,81 \pm 8,16$	$11,25 \pm 3,12$
11.08	$43,3 \pm 3,1$	$51,62 \pm 12,9$	$7,8 \pm 11,7$	$35,1 \pm 7,32$	$31,75 \pm 6,3$	$10,6 \pm 7,4$
1.09	$39,3 \pm 5,2$	$41,3 \pm 33,8$	$25,0 \pm 6,1$	$35,7 \pm 8,0$	$30,2 \pm 8,0$	$15,5 \pm 5,4$
23.09	$28,36 \pm 4,53$	$18,22 \pm 3,84$	$14,43 \pm 4,64$	$23,94 \pm 2,75$	$14,47 \pm 3,89$	$6,48 \pm 2,27$
3–4.10	$20,3 \pm 2,1$	$15,4 \pm 6,7$	$9,98 \pm 2,8$	$18,94 \pm 3,1$	$15,22 \pm 5,1$	$4,54 \pm 8,3$

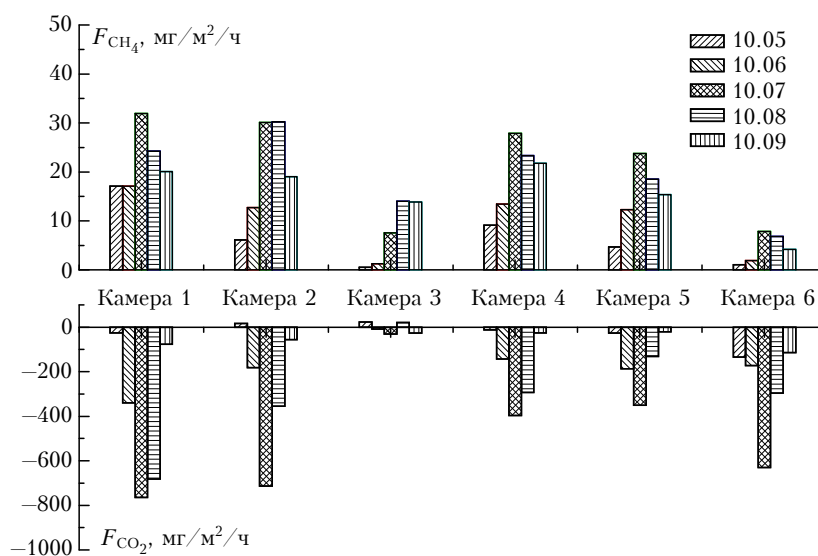


Рис. 12. Дневные потоки F_{CH_4} и F_{CO_2} для каждой из шести камер

а в табл. 4 они указаны в переводе на чистый углерод C_{CO_2} и C_{CH_4} для всего болотного участка.

Таблица 4

Потоки C_{CO_2} и C_{CH_4} (в переводе на чистый углерод) для всего болотного участка (г/га/ч)

Поток	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
C_{CO_2}	-99,9	-557,3	-1557,7	-958,4	-145,3
C_{CH_4}	57,2	86,2	182,5	154,8	118,0

Таким образом, по нашим измерениям, максимальные дневные потоки CO_2 и CH_4 для болотных экосистем наблюдаются в июле – августе. Для сравнения полученных нами потоков метана в болотных экосистемах можно привести данные похожих измерений на заболоченном участке Тибетского плато из работы [18], в которой сообщается о величинах дневных потоков с использованием метода статических камер, в пределах $(7,25 \pm 1,55)$ мг/м²/ч. Отметим, что эти измерения проходили в условиях среднегорья, где пониженное давление (~70 кПа) и прохладные дневные температуры отмечаются даже летом $(14,6 \pm 3,7)$ °С. Кроме того, под болотом присутствовала вечная мерзлота, что в Сибири больше соответствует условиям тундры, чем южной части Васюганского болота. И все же наши майские измерения дают похожие результаты при усреднении потоков по всем камерам $[(7,63 \pm 4,40)$ мг/м²/ч].

Заключение

Из приведенных данных видно, что потоки газов увеличиваются при удалении от края к центру болота или, иначе говоря, с увеличением мощности торфяной залежи и увлажнения поверхности. Исключение составляет интенсивное дневное поглощение CO_2 в камере б, что объясняется большой массой древесной растительности на высоком рьяме, активно участвующей в фотосинтезе. Интегральные значения потоков CO_2 за весь период измерений показывают, что поверхность болота является мощным «поглотителем» атмосферного углерода в светлое время суток и выделяет почвенный углерод в атмосферу («дыхание» растений) в среднем примерно 180 мг/м²/ч ночью.

При этом величины эмиссии метана из различных участков почв зависят от типа растительности и уровня прогрева почвы. Наименьшие значения (20–23 мг/м²/ч) для участков почв хвощево-сфагнумного сообщества (камеры 1 и 2) соответствуют середине мая и началу октября. Наибольшие значения эмиссии метана наблюдаются в июле и достигают (для нашего болота) более 50 мг/м²/ч для участков почвы с развитой мощной растительностью (хвощи высотой до 70 см). Такие высокие значения эмиссии метана в болотах Западной Сибири (и вообще в бореальных болотах) наблюдались относительно редко (см. [3, 11, 15, 19]), причем обычно были связаны с внутриволотными озерами, а не с мезотрофной топью. Можно отметить, что хотя температура почвы на глубине 1,25 м про-

должала увеличиваться до 9 сентября, наибольшие значения эмиссии метана отмечаются в первой половине июля. Это означает, что основная масса газообразного метана в болотистых почвах образуется на глубинах от 0,1 до 0,4 м ниже поверхности.

При этом интегральный бюджет углерода также зависит от типа растительности и свидетельствует об интенсивном его поглощении подстилающей поверхностью в течение всего теплого периода года.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70 и 131, грантов РФФИ № 14-05-00526, 14-05-00590, 14-05-93108, госконтрактов Минобрнауки № 14.604.21.0100 (RFMTFIBBB210290), 14.613.21.0013 (RFMEFI61314X0013), Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

1. Кароль И.Л., Киселев А.А. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. 2004. № 7. С. 47–52.
2. Climate change 2007: The physical science basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. by S. Solomon et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Ch. 7. P. 499–588.
3. Бажин Н.М. Атмосферный метан // Химия в интересах устойчивого развития. 1993. Т. 1. С. 381–396.
4. Наумов А.В. Углекислый газ и метан в почвах и атмосфере болотных экосистем Западной Сибири // Сиб. экол. ж. 2002. Т. 9, № 3. С. 313–318.
5. Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environm. Res. Lett. 2011. V. 6, N 4. P. 045214. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.
6. Глаголев М.В. Новое отечественное исследование эмиссии метана из болотных экосистем северной части Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2013. Т. 4, № 2(8). С. 1–13.
7. Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. Эмиссия метана торфяными залежами олиготрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Четвертого Международного полевого симпозиума (Новосибирск, 4–17 августа 2014 г.) / Под ред. А.А. Титляновой и М.И. Дергачевой. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. С. 157–159.
8. Глаголев М.В., Клептова И.Е. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Аа2) для Западной Сибири // Вестн. Томск. гос. пед. ун-та. 2009. № 3. С. 77–81.
9. Краснов О.А., Maksyutov S., Glagolev M.B., Kamaev M.Yu., Inoue G., Nadeev A.I., Шелевой В.Д. Автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1090–1097.
10. Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y. An image-based inventory of the spatial structure of west Siberian wetlands // Environ. Res. Lett. 2009. V. 4. 045014.
11. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. Methane fluxes from wetland in west Siberia during April–October 1998 // Proc. the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu, 1999. P. 115–124.

12. *Matthews E., Fung I.* Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 1987. V. 1, N 1. P. 61–86.
13. *Bartlett K.B., Harriss R.C.* Review and assessment of methane emissions from wetlands // *Chemosphere*. 1993. V. 26, N 1–4. P. 261–320.
14. *Stepanenko V.M., Machulskaya E.E., Glagolev M.V., Lykossov V.N.* Numerical Modeling of Methane Emissions from Lakes in the Permafrost Zone // *Izvestiya, Atmos. Ocean. Phys.* 2011. V. 47, N 2. P. 252–264. DOI: 10.1134/S0001433811020113.
15. *Olefeldt D., Turetsky M.R., Crill P.M., McGuire A.D.* Environmental and physical controls on northern terrestrial methane emissions across permafrost zones // *Glob. Change Biol.* 2013. V. 19, N 2. P. 589–603. DOI: 10.1111/gcb.12071.
16. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. С. 246–250.
17. *Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.* Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1980. 208 с.
18. *Lingfei Yu, Hao Wang, Guangshuai Wang, Weimin Song, Yao Huang, Sheng-Gong Li, Naishen Liang, Yanhong Tang, Jin-Sheng He.* A comparison of methane emission measurements using eddy covariance and manual and automated chamber-based techniques in Tibetan Plateau alpine wetland // *Environ. Pollut.* 2013. V. 181. P. 81–90.
19. *Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Filippov I.V., Kazantsev V.S., Machida T., Maksyutov Sh.Sh.* Methane Emissions from Subtaiga Mires of Western Siberia: The “Standard Model” Bc5 // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2010. V. 65, N 2. P. 86–93. DOI: 10.3103/S0147687410020067.

O.A. Krasnov, S. Maksyutov, D.K. Davydov, A.V. Fofonov, M.V. Glagolev, G. Inoue. Monitoring of methane and carbon dioxide emission from soil to atmosphere and soil parameters. Bakchar bog of Tomsk region (2014).

Long-term field measurements of GHG (methane and carbon dioxide) fluxes, at the “soil–atmosphere” interface using six static chambers and an automatic sampling and analysis system “Flux-NIES” from the six different plant associations of Vasyugan bog near Plotnikovo settlement (Tomsk region, 56°51.29' N, 82°50.91' E) during the warm period of 2015 have been presented. Soil temperature and underground water level as controlling factors to understand methane emission fluxes from soil to atmosphere through measurement period are discussed.