

УДК 551.510+556+631

МОНИТОРИНГ ПРОДУЦИРОВАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА ЛАНДШАФТНОМ ПРОФИЛЕ ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

© 2022 г. Л. И. Инишева^а*, А. В. Головченко^б^аТомский государственный педагогический университет, ул. Киевская, 60, Томск, 634061 Россия^бМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: inisheva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.01.2022 г.

После доработки 11.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Проанализирована многолетняя динамика параметров парниковых газов в ландшафтном профиле (ЛП) Васюганского болота, расположенного в южно-таежной зоне Западной Сибири. Автономная часть ЛП представлена осоково-сфагновой топью, транзитная часть – кустарничково-травяно-сфагновым фитоценозом с низкой сосной, аккумулятивная часть – кустарничково-травяно-сфагновым фитоценозом с высокой сосной. Торфяная залежь в пределах автономной и транзитной частей ЛП достигает мощности 3, аккумулятивной – 1 м. Концентрацию парниковых газов определяли “реергс”-методом, эмиссию – камерным методом. Установлено, что в разных климатических условиях концентрация CO₂ в торфяных залежах ЛП изменялась в пределах от 0.01 до 4.2 ммоль/дм³, концентрация CH₄ – от 0.01 до 2.19 ммоль/дм³. На фоне неравномерного распределения CO₂ и CH₄ в торфяных залежах выявлено увеличение их концентрации и уменьшение амплитуды колебаний с глубиной. Установлено достоверное влияние ботанического состава торфов на внутризалежную активность образования исследуемых газов. Временную изменчивость концентрации парниковых газов в верхнем метровом слое залежей ЛП в большей степени определяли погодные условия месяца: высокие значения концентрации CO₂ чаще регистрировали в июле, CH₄ – в мае и сентябре. Эмиссия CO₂ в торфяных залежах ЛП на протяжении восьмилетнего периода варьировала от 3.9 до 160.3 мг CO₂/(м² ч), потоки – от 17 до 120.5 г С/(м² год); эмиссия CH₄ – от –3.0 до 10.7 мг CH₄/(м² ч), потоки – от 0.5 до 6.7 г С/(м² год). На всех пунктах ЛП отмечали максимальные значения потоков углерода CO₂ и минимальные значения потоков углерода CH₄ в сухой год с гидротермическим коэффициентом (ГТК) 0.9. Потоки углерода CH₄, независимо от ГТК лет, последовательно возрастали от аккумулятивной к транзитной и далее к автономной частям ЛП.

Ключевые слова: Томская область, стационарные исследования, верховые торфяники, торфяная залежь, концентрация CO₂, CH₄, эмиссия

DOI: 10.31857/S0032180X2209009X

ВВЕДЕНИЕ

Проблема круговорота углерода относится к одной из самых приоритетных в учении о биосфере. Закономерности распределения углерода в земной коре показывают, что существуют две главные группы его нахождения: карбонатные и органические соединения. Их количественное соотношение является важным показателем, который характеризует “лимит роста” живого вещества на разных этапах геологической истории, который закономерно уменьшается на протяжении последних 1.6×10^9 лет. Согласно В.В. Добровольскому [5], продуктивность растительности Мировой суши до ее нарушения человеком составляла 80×10^9 т и сократилась до $60 \times$

$\times 10^9$ т углерода в современный период. В настоящее время наблюдается увеличение содержания парниковых газов в атмосфере, обусловленное, в основном, нарушением баланса углерода в биосфере [6, 33]. Около половины CO₂, поступающего в атмосферу в результате промышленных выбросов, связывается наземными экосистемами [10, 30]. Поглощение углерода из атмосферы наземными экосистемами может компенсировать выбросы [2, 27, 31, 39].

Исследования эмиссии парниковых газов [9, 11, 12, 14, 33] показывают, что для оценки отклика экосистем на изменение климата в глобальном масштабе необходимы факторы пространственной вариации, отражающие их топографию, свойства и режимы.

Болота, депонируя углерод атмосферы в виде торфяных залежей, исключают его из дальнейшего круговорота. Занимая значительные площади, они являются крупнейшим резервуаром углерода органического вещества (ОВ). По последним данным, площадь болот мира оценивается в 6.41×10^6 км², запасы углерода в торфяных залежах достигают $234\text{--}252 \times 10^9$ т [32]. В России площадь болот — 1.39×10^6 км², содержание в них углерода — 100.93×10^9 т [4]. Ежегодный прирост торфа обеспечивает связывание до 60×10^6 т углерода. Болота в отличие от других природных экосистем имеют полностью органигенный профиль до минеральной породы и, согласно [29], углеродный обмен в них осуществляется между жидкой фазой, газовой фазой и торфом, что и предопределяет их взаимовлияние. Структура в торфяной залежи формируется ботаническим составом, степенью разложения, химическим составом среды [13], а также соотношением продуктов распада и неразложившейся части растений. Высокая динамичность концентрации образующихся парниковых газов в торфяной залежи и процессов их эмиссии требуют проведения многолетних стационарных наблюдений для учета сезонной и межгодовой внутризалежной вариабельности.

Цель работы — оценка пространственной, внутри залежной вариабельности и временной изменчивости концентрации парниковых газов в торфяных залежах и их эмиссии на олиготрофном болоте в разных климатических условиях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в северо-восточной части Васюганского болота, расположенного в южно-таежной зоне Западной Сибири. Ландшафтный профиль (ЛП) заложен в пределах олиготрофного болота на малом заболоченном водосборе р. Ключ параллельно линиям стока и пересекает основные виды биогеоценозов по направлению к окраине болота. Профиль закреплен реперами, обоснован в плановом отношении, выполнена нивелировка поверхности, проведена нумерация пунктов исследования [7]. В данной работе исследования вели на пунктах 2, 3 и 5.

Пункт 2 (П2) расположен в аккумулятивной части ЛП ($56^{\circ}58'16.57''$ N $82^{\circ}36'08.11''$ E) и находится на окраине верхового водораздельного массива. Растительность — кустарничково-травяно-сфагновый фитоценоз с высокой сосной. Микро-рельеф представлен моховыми подушками и приствольными буграми высотой до 50 см, занимающими около 50% поверхности. Древесный ярус состоит из сосны (*Pinus silvestris* L.) с единичными растениями *Pinus sybirica* Mayr. и *Betula pubescens* Ehrh. Подрост представлен в основном сосной и единичными экземплярами кедра и березы. Ку-

старничковый ярус достигает высоты 50 см. Доминантами являются *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., довольно обильны брусника (*Vaccinium vitis-idea*, L.) и клюква (*Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.). Травяной покров включает *Carex globularis* L., *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L. Доминантами мохового покрова (96%) являются сфагновые мхи (*Sphagnum angustifolium* Jensen ex Russow). Торфяная залежь в пределах П2 имеет мощность 1 м. Верхний слой 0–25 см представлен олиготрофным сосново-пушицевым торфом со степенью разложения 35% и зольностью 5.8%. Затем до подстилающей минеральной породы идут слои древесно-пушицевого мезотрофного торфа со степенью разложения 55% и зольностью 6.8% (табл. 1).

Пункт 3 (П3) расположен в транзитной части ЛП ($56^{\circ}58'23.02''$ N $82^{\circ}36'43.78''$ E). Растительность — кустарничково-травяно-сфагновый фитоценоз с низкой сосной. Угнетенный древесный ярус состоит из *Pinus sylvestris* L. f. *litwinowii* Sukacz. Кустарничковый ярус, обильно развивающийся на микроповышениях, сложен *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L. и *Vaccinium uliginosum* L. На вершинах кочек растет клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.). Травяной ярус представлен куртинками *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L. и *Drosera rotundifolia* L. В моховом покрове на повышениях доминирует *Sphagnum fuscum* Klinggr. (95%), на межкочковых понижениях встречаются *Sph. angustifolium* Jensen ex Russow и *Sph. magellanicum* Brid. Торфяная залежь в пределах П3 достигает мощности 3 м. Верхний 1.5 м слой сложен олиготрофными торфами: фускум (степень разложения 5.0, зольность 1.5%), медиум (степень разложения 10%, зольность 3.1%) и сосново-пушицево-сфагновым (степень разложения 35%, зольность 4.6%). Ее сменяют 0.5 м слой осоково-сфагновых мезотрофных торфов: осокового (степень разложения 35%, зольность 4.6%) и травяного (степень разложения 40%, зольность 6.2), с глубины 2.0 м — осоковый и травяные эвтрофные торфа (степень разложения 45%, зольность 6.5%).

Пункт 5 (П5) — осоково-сфагновая топь, расположенная в центральной части болотного массива и представляющая автономную часть ЛП ($56^{\circ}58'17.57''$ N $82^{\circ}37'04.22''$ E), располагается в одном из центров образования Васюганского болота. Растительность — кустарничково-травяно-сфагновый фитоценоз. Кустарничковый ярус (*Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L., *Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.) высотой 10 см развит слабо и занимает преимущественно положительные элементы микро-рельефа. В травяном ярусе преобладают *Eriophorum vaginatum* L. и *Carex rostrata* Stokes. Моховой ярус представлен различными видами сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum* (Schimp) Klinger, *Sph. angustifolium* Jensen ex Rus-

Таблица 1. Характеристика торфяной залежи ландшафтного профиля

Глубина, см	Вид, тип торфа	Степень разложения торфа	Зольность торфа
		%	
Аккумулятивная часть ЛП/П2			
0–25	Сосново-пушицево-сфагновый, олиготрофный	35	5.8
25–100	Древесно-пушицевый, мезотрофный	55	6.8
Транзитная часть ЛП/П3			
0–100	Фускум, олиготрофный	5	1.5
100–150	Медиум, олиготрофный	10	3.1
150–200	Осоковый мезотрофный	35	4.6
200–250	Осоковый, эвтрофный	45	4.6
250–300	Травяной, эвтрофный	40	6.2
Автономная часть ЛП/П5			
0–50	Фускум, олиготрофный	5	2.3
50–100	Комплексный, олиготрофный	15	3.1
100–150	Осоково-сфагновый, мезотрофный	35	5.5
150–200	Осоковый, эвтрофный	50	5.8
200–250	Травяной, эвтрофный	50	9.2
250–300	Папоротниковый, эвтрофный	40	6.8

sow и *Sph. magellanicum* Brid.), формирующих микрорельеф. Торфяная залежь в пределах П5 достигает мощности 3.0 м. Верхний метровый слой сложен олиготрофными торфами: фускум (степень разложения 5%, зольность 2.3%) и сфагновым мочажинным (степень разложения 15%, зольность 3.1%). Его сменяет полуметровый слой осоково-сфагнового мезотрофного торфа, в котором степень разложения увеличивается до 35%, а зольность – до 5.5%. Слой 150–300 см представлен эвтрофными торфами (осоковым, травяным, папоротниковым), степень разложения которых находится в диапазоне 40–50%, а зольность – 5.8–9.2% (табл. 1).

Подстилающие породы на болоте – илистая темно-серая гумусированная глина с содержанием раковин пресноводных моллюсков.

Торфяные залежи в пределах ЛП были классифицированы как торфяные олиготрофные типичные на мелких торфах (П2) и остаточно-эвтрофные на глубоких торфах почвы (П3 и П5) [26], по WRB – Ombric Histosols [20].

Газовый режим в торфяных залежах изучали в летние периоды в 2004–2007 и 2010–2013 гг. в трехкратной повторности “реперс”-методом [7, 40]. Приборы для определения концентрации CO₂ и CH₄ были предоставлены отделением геологии факультета точных наук Университета Невшателя (Швейцария). В качестве пробоотборников использовали камеры из оргстекла размером 3 × 4 см и объемом 30 мл. Мембранный полисульфоновый фильтр накладывали на боковую стенку ка-

меры и фиксировали винтами. Камеру заполняли дистиллированной водой и закрывали ее аналогичным фильтром. Соединенные между собой полыми пластиковыми трубками камеры опускали на всю глубину торфяной залежи с учетом ее стратиграфии. Спустя 30 дней, необходимых для уравнивания газовой фазы торфяной залежи и камеры, камеры вынимали. Из каждой камеры через полисульфоновый мембранный фильтр шприцом производили забор жидкости, которую переносили в равном объеме (по 5 мл) в 3 вакутейнера. Для прекращения микробиологической активности добавляли в них 2–3 капли HgCl₂. Вакутейнеры помещали в коробку пробками вниз и доставляли в лабораторию. Далее после дегазации (вакутейнеры помещали в термостат при 50°C и в течение 30 мин периодически встряхивали) отобранный из вакутейнеров газ анализировали на газовом хроматографе “Кристалл 5000.1” (Россия).

Для измерения эмиссии CO₂ и CH₄ в 2004 и 2005 гг. использовали метод Шаркова [25], показания которого были скорректированы на основании параллельно проведенных опытов с методом статических замкнутых камер. С 2006 г. измерение эмиссии проводили камерным методом. В исследуемых пунктах ЛП устанавливали по 3 камеры [36]. Газовые замеры проводили ежемесячно в теплый период (май, июль, сентябрь), последовательно по пунктам наблюдений в одно и то же время. С целью определения оптимальных сроков для замера эмиссии газов были проведены исследования в течение дня в разные периоды ле-

та. В результате замеры на ЛП начинали всегда с 12.00 с П5 и заканчивали в 14.30 дня в П2. Экспозиционную камеру из оргстекла объемом 60.8 л, накрытую колпаком из теплоизоляции с ламинированной отражающей алюминиевой фольгой (тепфол А4 мм), на время измерения устанавливали на стальное основание размером 37 × 37 см, предварительно заглубленное в залежь. Герметизация системы достигалась с помощью гидрозатвора (вода заливалась в пазы основания, чтобы место контакта камеры и основания было погружено в воду). В отверстие на верхней поверхности камеры вставляли резиновую пробку с металлической трубкой и надетым на нее резиновым шлангом для отбора проб газа. Циркуляция воздуха в камере осуществлялась с помощью встроенного вентилятора. Из каждой камеры в равноотстоящие периоды времени производили отбор трех проб газа (общее время экспозиции составило 30–60 мин) и таким образом, на каждом пункте отбирали образцы газов в девяти повторностях. Газовый состав анализировали на хроматографе “Кристалл 5000.1”. Эмиссию рассчитывали по [21], при расчете суммарных потоков парниковых газов за теплый период исследуемых лет использовали численное интегрирование по методу трапеций.

В исследуемые месяцы влажность торфа определяли весовым методом (в пяти повторностях), уровень болотных вод (УБВ) – в колодцах каждого пункта. За нулевую отметку была принята условная отметка средней поверхности болотного ландшафта, положение уровня определяли как разность отметок репера и зеркала болотных вод [17]. Ботанический состав и степень разложения устанавливали согласно ГОСТ 28245.2–89, ГОСТ 28245.2–89 [16], полную влагоемкость – расчетным методом.

Все анализы выполнены в аккредитованной лаборатории Томского государственного педагогического университета (№ РОСС RU.0001.516054) и в Центре коллективного пользования Томского политехнического университета “Аналитический центр геохимии природных систем”.

Обработку массивов данных осуществляли с помощью пакета программ STATISTICA 8.0 и Microsoft Excel 10.0. Проводили дисперсионный анализ (Factorial ANOVA) и расчет коэффициентов корреляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика погодных условий. При характеристике погодных условий использовали гидротермический коэффициент (ГТК), представляющий отношение суммы осадков за теплый период с температурой выше 10°C к испаряемости, выраженной суммой температур за этот же период, уменьшенной в 10 раз. Репрезентативность

этого показателя обоснована в работе [3]. Исходные данные для расчета ГТК были взяты из интернета <http://meteocenter.net/> (2004–2012 гг.) и <http://aisori-m.meteo.ru/> (2013 г.).

За восьмилетний цикл исследований два года (2004, 2007 гг.) с ГТК 1.3–1.6 относились к средним годам за теплый период. Два года (2005 и 2011 гг.) с ГТК 1.8–2.1 характеризовались как увлажненные. К сухим годам принадлежали 4 года (2006, 2010, 2012, 2013 гг.) с ГТК 0.8–1.2. Следует отметить, что экстремально сухих лет, как и экстремально влажных, за исследуемый период не наблюдалось.

Уровень болотных вод и влажность. Амплитуда колебаний УБВ в П3 и П5 относительно средней поверхности болота за эти годы составила соответственно 16 и 13 см, в П2 она достигала 41 см, что свидетельствует о контрастном режиме влажности в аккумулятивной части болота. При движении к автономной части болота УБВ повышался, амплитуда УБВ соответственно уменьшалась. Влажность верхнего полуметрового слоя торфяной залежи в теплые периоды исследуемых лет поддерживалась в пределах 0.9–1.0 полной влагоемкости, в нижних слоях – на уровне полной влагоемкости, и только в П2 в отдельные годы в верхнем слое 0–50 см влажность уменьшалась до 0.7 полной влагоемкости.

Концентрация CO₂ и CH₄ в слое 0–100 см торфяных залежей ЛП. В связи с тем, что мощность залежи П2 – 1 м, сравним динамику газового режима по остальным пунктам ЛП в слоях 0–50 и 50–100 см. Рассмотрим, что происходит с концентрацией CO₂ в залежах ЛП на примере теплого периода представительных лет: влажного 2005 (ГТК 1.8) и сухого 2006 (ГТК 0.9) гг.

Концентрация CO₂ за 2 года в слое 0–50 см всех пунктов ЛП варьировала от 0.1 до 1.8 ммоль/дм³, в слое 50–100 см – от 0.2 до 4.2 ммоль/дм³. Концентрация CO₂ была больше в торфяной залежи П2 как по средним, так и по максимальным значениям (2.61 и 4.20 ммоль/дм³ соответственно). В меньших концентрациях CO₂ наблюдали в П3 и П5 (рис. 1). Во влажный год диапазон концентрации CO₂ в метровой торфяной залежи был в пределах 0.1–4.2, в сухой – 0.2–3.0 ммоль/дм³. В сухой год в П3 и П5 отмечали уменьшение концентрации CO₂ в слое 0–50 см только в сентябре (ГТК сентября – 0.5). В П2 такое уменьшение происходило в мае (ГТК мая – 1.0) во всем метровом слое, а в другие месяцы сохранялись невысокие значения – до 0.3 ммоль/дм³. Заметим, что скорость биогенной газогенерации в органогенной среде больше, чем интенсивность потенциальной диффузии в жидкой среде, поэтому на любой глубине торфяной залежи создаются условия локального скопления газов [15], поэтому в профиле отмечали пульсирующую динамику CO₂.

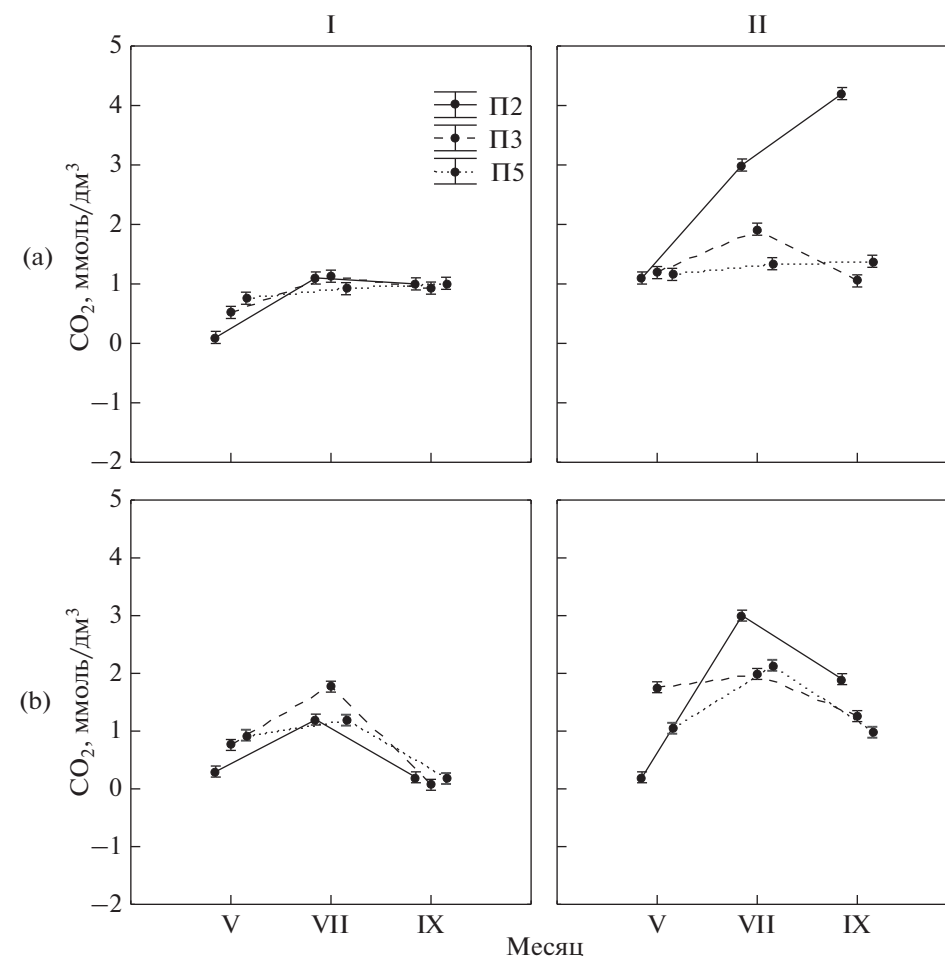


Рис. 1. Динамика концентрации CO_2 на глубине 50 см (I) и 50–100 см (II) торфяных залежей аккумулятивной (П2), транзитной (П3) и автономной (П5) частей ландшафтного профиля. Здесь и на рис. 2, 3 (a) и (b) – влажный и сухой годы соответственно.

Выше отмечалось, что торфяная залежь П2 разнообразна по типовому и видовому уровню слагаемых торфов. В то время как метровый слой в П3 и П5 по типу залежи и видовому составу одинаковый (тип – верховой, вид – сфагнум) и в незначительной степени различается в слое 50–100 см по видовому составу мхов (тип – верховой, вид – комплексный и медиум торф). В результате динамика концентрации CO_2 в П3 и П5 была близка по показателям, что указывает на важную роль ботанического состава торфяной залежи в формировании ее газового режима. Важно отметить и тот факт, что высокие концентрации CO_2 наблюдали на глубине 100 см независимо от ГТК года.

Полученные данные по концентрации CO_2 были проанализированы с помощью четырехфакторного дисперсионного анализа. Оценивали влияние на динамику концентрации CO_2 следующих параметров: пункт, год, месяц наблюдений и глубина слоя торфяной залежи (табл. 2). Проведенный анализ выявил достоверное влияние учитываемых

параметров на динамику концентрации CO_2 , но в большей степени (71% общей дисперсии (ОД)) она зависела от глубины залегания слоя. Для всех пунктов ЛП независимо от ГТК года абсолютные значения концентрации CO_2 и амплитуда их колебаний были больше на глубине 100 см, чем на глубине 50 см. Вторым по влиянию (23% ОД) оказался месяц наблюдений. Максимальные значения концентрации CO_2 чаще выявляли в июле. Динамика CO_2 в меньшей степени зависела от пункта наблюдений (4% ОД) и года исследования (2% ОД). В пункте 2, имеющем наименьшую мощность залежи, были отмечены существенные различия по концентрации CO_2 между глубинами и месяцами. Для осоково-сфагновой топи (П5) концентрация CO_2 в большей степени различалась по годам: ее колебания были сглажены во влажный и отчетливо выражены в сухой год (рис. 1).

Сложность процессов, происходящих в торфяных залежах болот разной стратиграфии, далеко не всегда подтверждает закономерности динамики

Таблица 2. Влияние факторов на концентрацию CO₂ и CH₄ в торфяных залежах ландшафтного профиля (по результатам четырехфакторного дисперсионного анализа)

Фактор*	Дисперсия	Критерий Фишера	% от общей дисперсии	Уровень значимости
CO ₂				
Пункт	1.1903	168.96	4	<0.0001
Год	0.7154	101.56	2	
Месяц	7.4866	1062.76	23	
Глубина	22.8252	3240.17	71	
CH ₄				
Пункт	0.0047	8.73	2	0.0004
Год	0.0007	1.36	0	0.2480
Месяц	0.0239	44.72	9	0.0001
Глубина	0.2389	446.48	89	0.0001

* Рассматриваемые факторы и их градации: пункты ЛП – П2, П3, П5; год – влажный, сухой; месяц – май, июль, сентябрь; глубина – 50, 50–100 см. Влияние фактора достоверно при уровне значимости $p < 0.05$

концентрации парниковых газов, отмечаемые исследователями в других экосистемах. Так, предполагается образование CO₂ в аэробных слоях залежи, а в торфяных залежах он обнаруживается в глубоких слоях с преимущественно анаэробными условиями. Образование CH₄ считается облигатно анаэробным процессом, но в торфяных залежах он может присутствовать и в поверхностном аэробном слое залежи.

Рассмотрим динамику концентрации CH₄ в слоях 0–50 и 50–100 см в залежах ЛП во влажный и в сухой годы исследования, также как это было сделано выше для CO₂. Концентрация CH₄ в слое 0–50 см всех пунктов ЛП за 2 года варьировала от 0.01 до 1.15 ммоль/дм³, в слое 50–100 см – от 0.11 до 0.26 ммоль/дм³. Во влажный год диапазон значений концентрации CH₄ был от 0.01 до 0.26, в сухой год – от 0.01 до 0.22 ммоль/дм³ (рис. 2). Концентрация CH₄, как и в случае с CO₂ была наибольшей в слое 50–100 см, причем в оба года, а в П5 по значениям была выше в сухой год. Осоково-сфагновая топь (П5) выделялась среди других пунктов ЛП максимальной концентрацией CH₄ на исследуемых глубинах во все сроки наблюдений. Можно заметить, что характер динамики CH₄ в П3 и П5 отличается от выше рассмотренной динамики CO₂ в этих же пунктах. Полагаем, это связано с особенностями процесса метанообразования в разных по ботаническому составу слоях торфяных залежей. Отсюда следует, что неравномерность образования CH₄ в болотах объясняется временными и внутренними факторами, которые в свою очередь благоприятствуют локальному скоплению CH₄ преимущественно в нижней части торфяной залежи и далее распространяются в ней в различных направлениях, не выделяясь в атмосферу.

Полученные данные по концентрации CH₄ были проанализированы с помощью четырехфакторного дисперсионного анализа (табл. 3). Динамику концентрации CH₄ на ЛП, как и в случае с CO₂, в большей степени (89% ОД) определяла глубина слоя залежи. Концентрация CH₄ в слое 50–100 см была в 1.5–16 раз больше, чем в слое 0–50 см. Вклад пространственной вариабельности (пункт наблюдения) и временной (месяц наблюдения) изменчивости в общую дисперсию был значительно меньше (9 и 2% соответственно). Концентрация CH₄ на исследуемых пунктах характеризовалась максимальными значениями не в июле (как для CO₂), а в мае и сентябре, что можно объяснить более высокими значениями ГТК в эти периоды.

Важно обратить внимание на тот факт, что в болотах газовый режим в значительной степени определяется водно-физическими и биохимическими свойствами торфяной залежи. Биохимические свойства в залежах формируются преимущественно в условиях субкавальной консервации растений-торфообразователей. По мере накопления растительной массы слои торфяной залежи, перекрываемые новыми порциями растительных остатков, постепенно погружаются на глубину и попадают в зону аэробно-анаэробного разложения, где процессы трансформации ОВ имеют интенсивность уже совершенно иного порядка [24, 28]. На первый план выходят биохимические процессы превращения ОВ торфов (дегидратация и декарбоксилирование), приводящие к полимеризации, упрочнению молекул сложных полимеров. В результате в торфяных залежах формируется самостоятельная газовая фаза, обусловленная в том числе и кинетическими особенностями биохимических процессов, что наблюдалось в рассмотренной выше динамике парниковых газов в залежах ЛП.

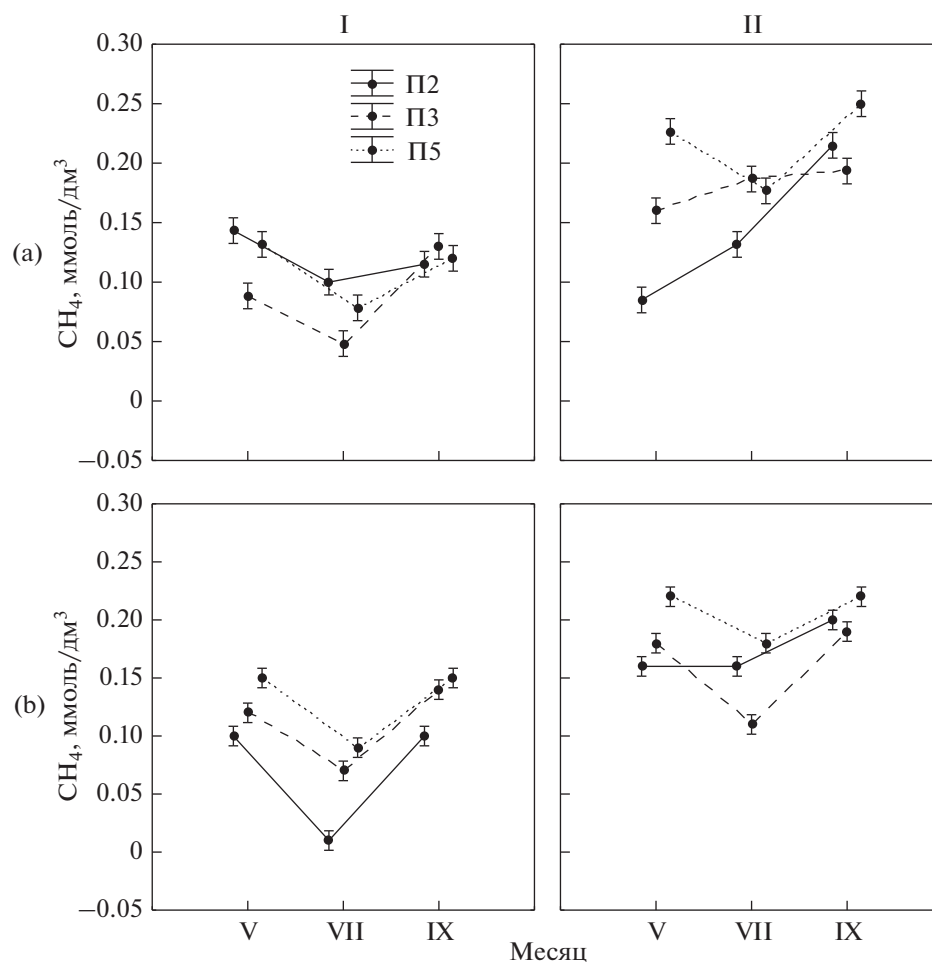


Рис. 2. Динамика концентрации CH_4 на глубине 50 см (I) и 50–100 см (II) торфяных залежей аккумулятивной (П2), транзитной (П3) и автономной (П5) частей ландшафтного профиля.

Концентрация CO_2 и CH_4 в трехметровой торфяной залежи. Рассмотрим динамику концентраций CO_2 и CH_4 в торфяной залежи за теплый период 2011 (ГТК 2.1) и 2012 (ГТК 0.8) на примере трехметровой залежи транзитной части ЛП – П3 (рис. 3). Уровень болотных вод в П3 с мая по сентябрь 2011 г. изменялся от (–23) до (–27) см, тогда

как в 2012 г. – от 22 до 42 см относительно средней поверхности болота.

В этих условиях концентрация CO_2 в верхнем метровом слое П3 за двухлетний период наблюдений варьировала от 0.03 до 0.40 ммоль/дм³, в слое 2–3 м – от 0.16 до 0.69 ммоль/дм³. В глубоких сло-

Таблица 3. Влияние факторов на концентрацию CO_2 и CH_4 в торфяной залежи П3 – транзитной части ландшафтного профиля (по результатам трехфакторного дисперсионного анализа)

Фактор*	Дисперсия	Критерий Фишера	% от общей дисперсии	Уровень значимости
CO_2				
Год	0.0904	211.31	16	<0.0001
Месяц	0.0111	25.96	2	
Глубина	0.4676	1092.58	82	
CH_4				
Год	0.0386	676.76	23	<0.0001
Месяц	0.0043	75.18	3	
Глубина	0.1209	2119.99	74	

* Рассматриваемые факторы и их градации: год – влажный, сухой; месяц – май, июль, сентябрь; глубина – 50, 50–100, 100–150, 150–200, 200–300 см. Влияние фактора достоверно при уровне значимости $p < 0.05$

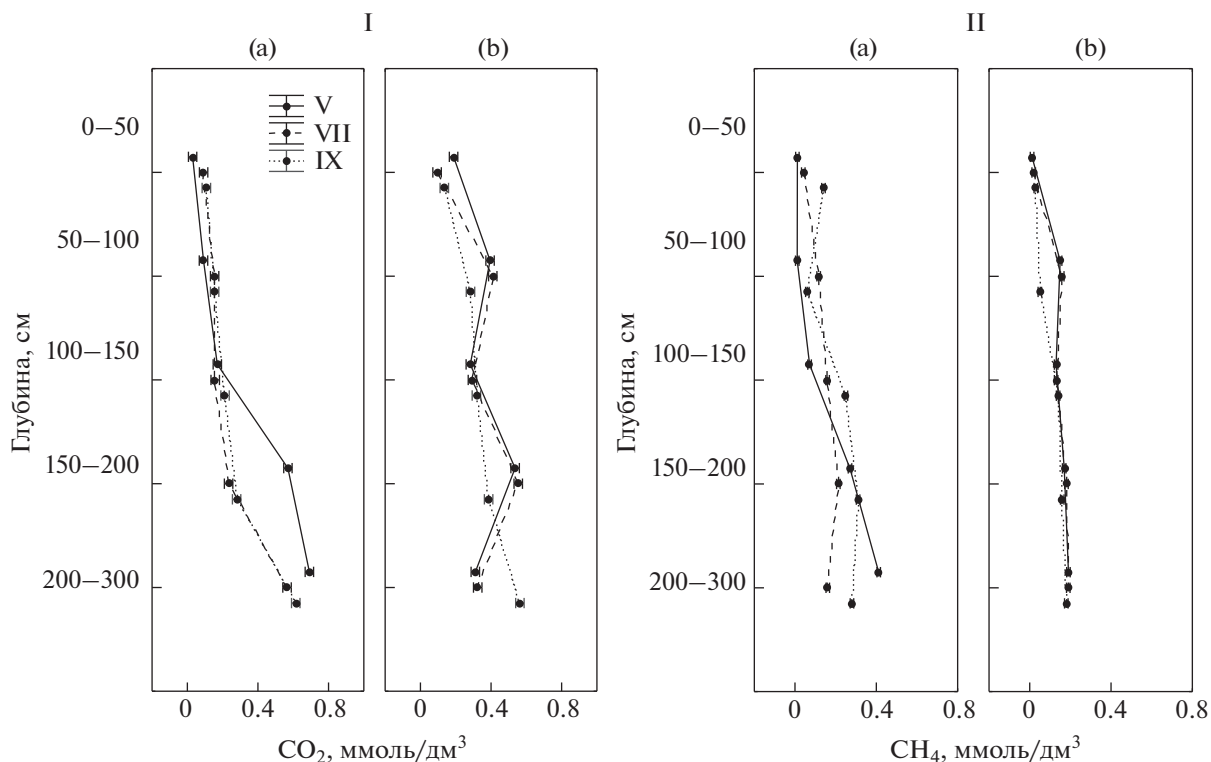


Рис. 3. Динамика концентрации CO₂ (I) и CH₄ (II) в торфяной залежи транзитной части ландшафтного профиля – ПЗ.

ях залежи значения были больше, а амплитуда их колебаний меньше, чем в верхнем слое. Во влажный год происходило постепенное увеличение концентрации CO₂ к подстилающей породе. Оно имело более выраженный характер в мае с ГТК 1.4. В сухой год показатели концентрации CO₂ сильно флуктуировали по профилю. Однако, тенденция увеличения CO₂ вниз по профилю сохранялась. Граничным слоем, где происходило увеличение, можно обозначить преимущественно слой 150–200 см, в котором олиготрофный тип сменился на мезотрофный тип торфа, представленный мезотрофным осоковым торфом.

Концентрация CH₄ в верхнем метровом слое ПЗ в 2011 (ГТК 2.1) и 2012 гг. (ГТК 0.8) изменялась в пределах 0.01–0.14 ммоль/дм³, в слое 2–3 м – 0.06–0.41 ммоль/дм³. Поверхностные слои залежи при снижении УБВ, характеризовались, как правило, минимальными значениями концентрации метана, что подтверждается и другими исследователями [30, 35, 37, 38]. Отмечено возрастание концентрации CH₄, как и CO₂, вниз по профилю. Оно имело более выраженный характер в слоях 100–150 и 150–200 см. Следует отметить, что во влажный год концентрация CH₄ была в 2 раза больше, а ее различия как между слоями залежи, так и по месяцам, оказались более существенными, чем в сухой год (рис. 3).

Достоверность выявленных различий подтверждена результатами трехфакторного дисперсионного анализа. Динамику концентрации CO₂, как и CH₄ в большей степени определяла глубина слоя (82 и 74% ОД соответственно). Меньшее влияние оказывали год (16 и 23% ОД) и месяц (2 и 3% ОД соответственно) исследования (табл. 3).

Мониторинг средних значений концентраций CO₂ и CH₄ на ЛП. За восьмилетний период наблюдений средние значения концентрации CO₂ в торфяных залежах ЛП находились в пределах 0.2–2.6 ммоль/дм³. В отдельные месяцы концентрация CO₂ в экстремальных значениях опускалась до минимального значения 0.01, а в максимальном – не превышала 4.20 ммоль/дм³. В работах других авторов, изучавших газовый режим олиготрофных болот этой же территории, разовые замеры концентрации CO₂ варьировали от 0.12 до 3.16 ммоль/дм³ [18], а согласно [19], концентрация CO₂ изменялась от 0.04 до 1.98 ммоль/дм³.

За восьмилетний период средние значения концентрации CH₄ в залежах ЛП изменялись в пределах 0.03–1.50 ммоль/дм³. В отдельные месяцы концентрация CH₄ уменьшалась до 0.001 и увеличивалась до 2.19 ммоль/дм³. Согласно [1, 19], концентрация CH₄ в олиготрофных болотах этой же территории по разовым наблюдениям по-

казывала значения от 0.1 до 3.0 ммоль/дм³. Изменение концентрации CH₄ в торфяных залежах ПЗ и П5 так же, как в случае с CO₂, наиболее часто происходило на границе смен типов торфов 100–150 и 150–200 см. Верхние слои при низком стоянии болотных вод как правило характеризовались концентрацией CH₄, близкой к нулю.

Корреляция между концентрациями исследуемых газов, свойствами залежи и климатическими условиями. Различный характер динамики концентрации парниковых газов на ЛП обусловлен и внутризалежными факторами. Одним из них является ботанический состав торфов на типовом и видовом уровнях [34, 37]. Известно, что направленность трансформации ОВ торфов характеризуется скоростью выделения CO₂, которая определяется их химической природой. Ранее было показано, что по величине накопления CO₂ в процессе минерализации верховые торфа располагаются в ряд: сфагново-мочажинный > комплексный > фускум > пушицево-сфагновый > > шейхцериевый > пушицевый [8].

Проведенный в настоящем исследовании однофакторный дисперсионный анализ выявил достоверное влияние ботанического состава торфа как на концентрацию CO₂ (F (критерий Фишера) = 27.7 при p (уровень значимости) < 0.0001), так и на концентрацию CH₄ (F = 18.3 при p < 0.0001). Максимальные значения концентрации CO₂ выявляли в слоях, представленных комплексным (олиготрофный тип) и древесно-пушицевым (мезотрофный тип) торфами. Концентрация CH₄ последовательно возрастала от верховых к переходным и далее к низинным торфам.

Также была выявлена высокая линейная связь ($0.77 < r < 0.92$) между температурой и концентрацией CO₂ в слоях 0–50 и 50–100 см и средняя положительная связь ($0.50 < r < 0.61$) между температурой и концентрацией CH₄ в слое 50–100 см всех пунктов ЛП. При расчете коэффициентов корреляции между концентрацией газов и температурой в трехметровой залежи ПЗ выявлена высокая обратная связь, то есть концентрация исследуемых газов увеличивалась с уменьшением температуры по профилю.

Высокая обратная связь выявлена между концентрациями парниковых газов в слое 0–50 см ПЗ и УБВ ($r = -0.9$). Понижение УБВ приводило к увеличению концентрации CO₂, как во влажный, так и в сухой годы исследования, что касается концентрации CH₄, то ее обратная связь с УБВ во влажный год сменялась на прямую в сухой год.

Таким образом, процессы, протекающие в торфяных залежах олиготрофных болот, многофакторные, и выявить механизм совместного влияния всех показателей на формирование газового режима представляет определенную трудность и пока

остаётся открытым. Обратим внимание на тот факт, что болотные экосистемы относятся к водным объектам, так как в их составе до 98% принадлежит воде. Двухфазная система болотная вода–газ требует учета закономерностей карбонатно-кальциевого равновесия и его обратимости в растворах [22]. Величины рН_{сол} в торфах ЛП изменялись в пределах 2.4–4.5, что определило абсолютное преобладание растворенного CO₂ над всеми остальными формами.

Принимая во внимание отмеченные особенности динамики концентрации CO₂ и CH₄ по ЛП и в торфяных залежах ЛП, рассмотрим их эмиссию.

Эмиссия и потоки парниковых газов. Эмиссия CO₂ в торфяных залежах за теплые периоды лет исследований варьировала от 3.9 до 160.3 мг CO₂/(м² ч) (табл. 4). Повышенную эмиссию CO₂ отмечали в более сухие по ГТК годы. Например, в 2006 г. с ГТК 0.9 она составила в П2, П3, П5 соответственно 101.5, 113.4, 120.2 мг CO₂/(м² ч). Пункты П3 и П5 с мощностью залежи 3 м характеризовались близкими значениями эмиссии CO₂. Эмиссия CO₂ в пункте П2 с метровой залежью отличалась от остальных пунктов. Во влажный год она была больше, а в сухие и средние годы – меньше, чем в П3 и П5. Надо полагать, что мощность торфяной залежи является немаловажным фактором, влияющим на эмиссию парниковых газов.

Исследования показали, что за теплые периоды (май–сентябрь) 2004–2007 и 2011–2013 гг. потоки углерода CO₂ на ЛП не превышали 120 г С/(м² г) и не опускались ниже 17 г С/(м² г) (рис. 4). Анализ динамики потоков углерода CO₂ в разные по ГТК годам и пунктам ЛП не выявил четких закономерностей. Однако следует отметить, что на всех пунктах ЛП отмечали максимальные значения потоков углерода CO₂ в сухой год с ГТК 0.9.

Эмиссия CH₄ в исследуемых торфяных залежах за теплые периоды лет исследований варьировала от (–3.0) до 10.7 мг CH₄/(м² ч). Эмиссия CH₄ в отличие от CO₂ характеризовалась наименьшими значениями в сухие годы. Ее увеличение происходило в годы с ГТК > 1.3. За весь период наблюдений только в мае 2011 г. эмиссия метана имела отрицательное значение (–3.0) мг CH₄/(м² ч). На ландшафтном профиле эмиссия метана нарастала в ряду П2 < П3 < П5. Максимальных значений она достигала в осоково-сфагновой топи (П5), занимающей автономную позицию ЛП. Контрастный водный режим, вследствие аккумулятивной позиции на ЛП и небольшой мощности торфяной залежи, снижали процесс метанообразования на П2, о чем свидетельствуют минимальные значения эмиссии CH₄ среди всех пунктов ЛП.

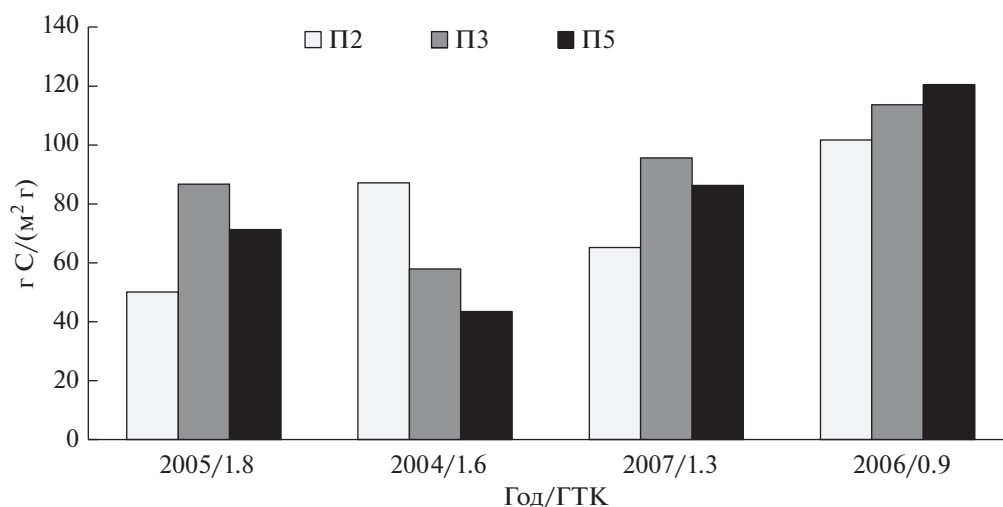


Рис. 4. Потоки CO₂ за теплый период 2004–2007 гг. из торфяной залежи ландшафтного профиля.

Потоки CH₄ изменялись в диапазоне 0.5–6.7 г С/(м² г). В годы с ГТК 1.3–1.8 потоки углерода CH₄ на каждом из пунктов ЛП характеризовались близкими значениями, тогда как в год с ГТК 0.9 они опускались до минимальных значений. Относительно позиции на ЛП – четко прослеживали тенденцию увеличения потоков углерода CH₄ от П2 к П3 и П5, не зависящую от ГТК исследуемых лет (рис. 5).

Важно отметить, что невысокие значения эмиссии метана в южно-таежной зоне Западной Сибири, возможно, предопределены преобладанием на

исследуемой территории практически постоянных влажных климатических условий. Большинство лет исследований оказались близки к среднегодовым значениям. Экстремально влажные и сухие годы бывают крайне редко и сложно предположить реакцию образования потоков газов в этих условиях. Например, для особо обводненных участков северной части Западно-Сибирской равнины приводятся годовые значения потоков CH₄ в пределах 10–20 г С/(м² г), из них на зимние – приходится не более 3% [23].

Обнаружение многочисленных связей между показателями продуцирования парниковых газов

Таблица 4. Диапазон значений (над чертой) и средние за год значения (под чертой) эмиссии CO₂ и CH₄ в торфяных залежах ландшафтного профиля

Год/ГТК	CO ₂ , мг CO ₂ /(м ² ч)			CH ₄ , мг CH ₄ /(м ² ч)		
	П2	П3	П5	П2	П3	П5
2004/1.6	56.8–121.0	32.9–95.2	20.5–87.9	1.0–3.2	1.2–5.3	1.9–10.7
	86.8 ± 11.7	57.7 ± 11.2	43.4 ± 22.2	2.2 ± 0.4	3.1 ± 0.7	6.1 ± 1.7
2005/1.8	11.0–96.8	51.3–110.0	–	1.3–2.6	2.2–4.1	3.1–8.8
	50.0 ± 15.0	86.5 ± 10.3	–	2.0 ± 0.3	3.5 ± 0.4	6.3 ± 1.1
2006/0.9	60.2–148.3	49.6–157.8	67.1–160.3	0.4–2.7	2.1–3.3	2.2–4.6
	101.5 ± 18.1	113.4 ± 19.1	120.3 ± 7.6	1.6 ± 0.4	2.6 ± 0.2	3.6 ± 0.4
2007/1.3	29.3–96.8	77.0–110.0	71.1–101.0	1.5–2.6	2.2–4.1	3.1–8.8
	65.0 ± 19.6	95.3 ± 9.7	86.1 ± 6.7	2.0 ± 0.4	3.3 ± 0.6	6.7 ± 1.8
2011/2.1	–	22.2–42.7	–	–	(–3.0)– 2.1	–
	–	17.0 ± 4.1	–	–	0.5 ± 0.1	–
2012/0.8	–	10.1–47.4	–	–	1.3–3.4	–
	–	24.0 ± 11.8	–	–	2.1 ± 0.7	–
2013/1.2	–	3.9–31.7	–	–	1.3–2.8	–
	–	21.6 ± 8.9	–	–	2.1 ± 0.4	–

Примечание. Прочерк – не определяли, “±” – доверительный интервал.

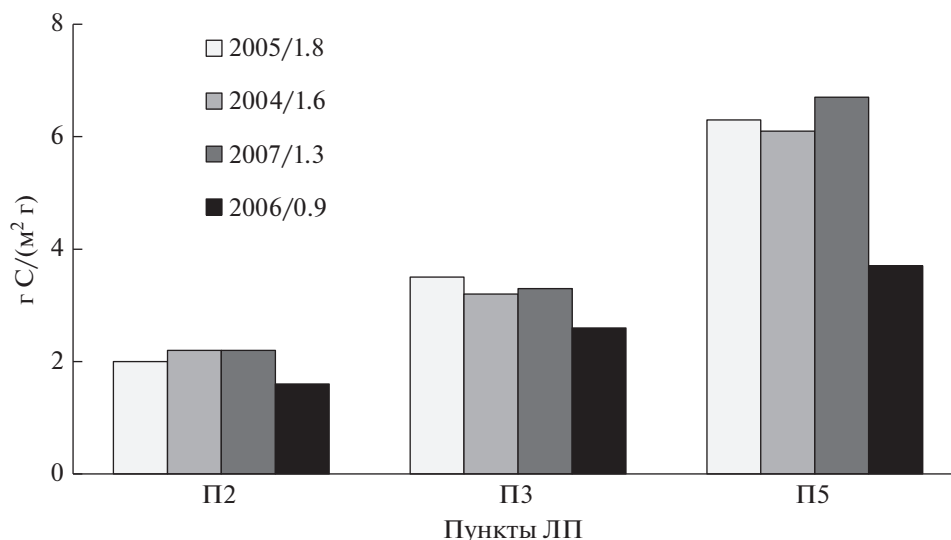


Рис. 5. Потoki CH₄ за теплый период 2004–2007 гг. из торфяной залежи ландшафтного профиля.

и различными параметрами режимов свидетельствует о сложности внутри залежных процессов и необходимости дальнейшего изучения факторов, влияющих на их активность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За многолетний период исследования торфяных залежей на ландшафтном профиле олиготрофного болота южно-таежной зоны Западной Сибири определено, что концентрация CO₂ изменялась в пределах от 0.01 до 4.20 ммоль/дм³, эмиссия – от 3.9 до 160.3 мг CO₂/(м² ч), потоки – от 17 до 120.5 г С/(м² г). Концентрация CH₄ варьировала от 0.01 до 2.19 ммоль/дм³, эмиссия – от 0.4 до 10.7 мг CH₄/(м² ч), потоки – от 0.5 до 6.7 г С/(м² г).

Установлено, что в торфяных залежах ЛП имеет место пространственная, внутризалежная вариабельность и временная изменчивость концентраций парниковых газов. В большей степени проявляется их внутризалежная вариабельность. На фоне неравномерного распределения CO₂ и CH₄ в торфяных залежах обнаружена закономерность увеличения их концентрации и уменьшения амплитуды их колебаний с глубиной, что указывает на важность учета мощности торфяной залежи при определении депонированного и эмитируемого углерода в виде парниковых газов. Временную изменчивость концентрации парниковых газов в верхнем метровом слое залежей в большей степени определяли погодные условия месяца, а не года наблюдений. В этом слое максимальные значения концентрации CO₂ чаще регистрировали в июле, CH₄ – в мае и сентябре. При рассмотрении трехметровой залежи (на примере транзит-

ной части ЛП) максимальное влияние оказывал год исследования. Концентрация CH₄ во влажный год с ГТК 2.1 была в 2 раза больше, чем в сухой год с ГТК 0.8. Пространственная вариабельность определялась водным режимом и соответственно положением пункта на ЛП. Образование CH₄ более активно проходило в метровой залежи осоково-сфагновой топи, занимающей автономную позицию ЛП.

Отмечено достоверное влияние типового и видового состава торфов, слагающих торфяную залежь, на внутризалежную активность образования CO₂ и CH₄.

Максимальные значения потоков углерода CO₂ и минимальные CH₄ выявляли на всех пунктах ЛП в сухой год с ГТК 0.9. Потоки углерода CH₄, независимо от ГТК лет, последовательно возрастали от аккумулятивной к транзитной и далее к автономной части ЛП.

В целом олиготрофные болота южно-таежной зоны Западной Сибири выделяют углерод в виде газов CO₂ и CH₄ в небольших количествах, если сравнить с его депонированием на этой территории. Вот почему столь важно при планировании освоения торфяных ресурсов определиться с выделением на территории Западной Сибири охраняемого фонда этих природных экосистем, являющихся значительными резервуарами потенциально мобильного органического углерода на планете.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках программы развития междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Буду-

шее планеты и глобальные изменения окружающей среды” и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-05197.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бажин Н.М.* Метан в атмосфере // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 3. С. 52–57.
2. *Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Рыжова И.М., Макаров М.И., Тимофеева М.В.* Распределение компонентов углеродного цикла почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги Западной Сибири // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1328–1340.
3. *Будыко М.И.* Изменения климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.
4. *Вомперский С.Э.* Роль болот в круговороте углерода // Биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука, 1994. С. 5–37.
5. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
6. *Елисеев А.В.* Глобальный цикл метана: обзор // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 52–70.
7. *Инишева Л.И., Виноградов В.Ю., Голубина О.А., Ларина Г.В., Порохина Е.В., Шинкеева Н.А., Шурова М.В.* Болотные стационары Томского государственного педагогического университета. Томск: Изд-во ТГПУ, 2010. 118 с.
8. *Инишева Л.И., Дементьева Т.В.* Скорость минерализации органического вещества торфа // Почвоведение. 2000. № 2. С. 196–203.
9. *Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л.* Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO₂ из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
10. *Кудяров В.Н.* Результаты 25-летних исследований углеродного баланса на территории России // Проблемы истории, методологии и социологии почвоведения. Пушино: Товарищество научных изданий КМК, 2017. С. 12–17.
11. *Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г.* Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
12. *Курганова И.Н., Лопес-де-Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурин В.А., Кудяров В.Н.* Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговых ценозах Приокско-террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1220–1236. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20100111>
13. *Лиштван И.И., Базин Е.Т., Косов В.И.* Физические свойства торфа и торфяных залежей. Минск: Наука и техника, 1985. 326 с.
14. *Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Меняйло О.В., Верховец С.В., Тычков И.И., Урбан А.В., Рубцов А.В., Кошурникова Н.Н., Ваганов Е.А.* Влияние климатических факторов на эмиссию CO₂ из почв в средне-таежных лесах Центральной Сибири: эмиссия как функция температуры и влажности почвы // Экология. 2020. № 1. С. 51–61. <https://doi.org/10.31857/S0367059720010060>
15. *Махов Г.А., Бажин Н.М., Ефремова Т.Т.* Эмиссия метана из болот междуречья рек Оби и Томи // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. № 2. С. 619–622.
16. Методы определения ботанического состава и степени разложения. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1989.
17. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. Вып. 8. 360 с.
18. *Наумов А.В.* К вопросу об эмиссии углекислого газа и метана из болотных почв южного Васюганья // Сибирский экологический журнал. 1994. № 3. С. 269–274.
19. *Наумов А.В.* Углекислый газ и метан в почвах и атмосфере болотных экосистем Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2002. № 3. С. 313–318.
20. Национальный атлас почв Российской Федерации / Ред. С.А. Шоба. М.: Астрель АСТ, 2011. 632 с.
21. *Орлов Д.С., Минько О.И., Аммосова Я.М., Каспаров С.В., Глагольев М.В.* Методы исследования газовой функции почвы // Современные физические и химические методы исследования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. С. 118–156.
22. *Смагин А.В.* Газовая функция почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
23. *Смагин А.В., Шнырев Н.А., Садовникова Н.Б.* Поток метана в холодное время года: оценка методом закрытых камер // Почвоведение. 2016. № 2. С. 227–234. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1602012X>
24. *Тюремнов С.Н.* Торфяные месторождения. М.: Наука, 1976. 487 с.
25. *Шарков И.Н.* Абсорбционный метод определения эмиссии CO₂ из почв // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия, 2005. С. 401–407.
26. *Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И.* Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
27. *Chenu C., Angers D.A., Barré P., Derrien D., Arrouays D., Balesdent J.* Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations // Soil and Tillage Research. 2019. V. 188. P. 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
28. *Clymo R.S.* Assessing the accumulation of carbon in peatlands // Northern peatlands in global climate change. FDITA / Eds.: R. Laiho, L. Jukka, H. Vasander. Helsinki: Publ. of Academy of Finland, 1996. P. 207–212.
29. *Clymo R.S., Bryant C.L.* Diffusion and mass flow of dissolved carbon dioxide, methane, and dissolved organic carbon in a 7-m deep raised peat bog // Geo-

- chimica et Cosmochimica Acta. 2008. V. 72. № 8. P. 2048–2066.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.032>
30. Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice. Cambridge: University Press, 2016. P. 66–79.
<https://doi.org/10.1017/cbo9781139177788.005>
 31. Köster E., Köster K., Berninger F., Prokushkin A., Aaltonen H., Zhou X., Pumpanen J. Changes in fluxes of carbon dioxide and methane caused by fire in Siberian boreal forest with continuous permafrost // J. Environmental Management. 2018. V. 228. P. 405–415.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.051>
 32. Lappalainen E. General review on world peatland and peat resources: Global peat resources. Finland: Saarijärvi, 1996. P. 53–57.
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_161
 33. Le Quéré C., Andrew R.M., Canadell J.G et al. Global Carbon Budget // Earth Syst. Sci. Data. 2016. V. 8. № 2. P. 605–649.
<https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>
 34. Moore T.R. Dissolved organic carbon in a northern boreal landscape // Global Biogeochemical Cycles. 2003. V. 17. № 4. 110914.
<https://doi.org/10.1029/2003gb002050>
 35. Naumov A.V. Emission of CH₄ and CO₂ in connection with temperature conditions of peat bog soils in the northern taiga // West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present subzone. Noyabrsk: Proceedings of the International Field Symposium. Novosibirsk, 2001. P. 110–112.
 36. Naumov A.V., Smolentseva E.N. Chapter 7. Estimation of carbon dioxide exchange of cascade geochemically conjugated steppe ecosystems in salinity condition // Steppe ecosystems: biological diversity, management and restoration. N.Y.: Nova Science, 2013. P. 153–163.
 37. Nilsson M., Bohlin E. Methane and Carbon Dioxide Concentrations in Bogs and Fens with Special Reference to the Effects of the Botanical Composition // Peat J. Ecology. 1993. V. 81. № 4. P. 615–625.
<https://doi.org/10.2307/2261660>
 38. Romanowicz E.A., Siegel D.I., Chanton J.P., Glaser P.H. Temporal variations in dissolved methane deep in the Lake Agassiz Peatlands, Minnesota // Global Biogeochemical Cycles. 1995. V. 9. № 2. P. 197–212.
<https://doi.org/10.1029/95gb00634>
 39. Song X., Wang G., Hu Z., Ran F., Chen X. Boreal forest soil CO₂ and CH₄ fluxes following fire and their responses to experimental warming and drying // Science of the Total Environment. 2018. V. 664. P. 862–872.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.014>
 40. Steinmann Ph., Shotyk W. Sampling anoxic pore water in peatlands using “peepers” for in situ-filtration // Fresenius J. Analytical Chemistry. 1996. V. 354. P. 709–713.
<https://doi.org/10.1007/s0021663540709>

Monitoring of Greenhouse Gas Production on the Landscape Profile of the Vasyugan Swamp

L. I. Inisheva¹, * and A. V. Golovchenko²

¹ Tomsk State Pedagogical University, Tomsk, 634061 Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: inisheva@mail.ru

This study deals with the analysis of long-term trends in greenhouse gas concentration, emission and flows in the landscape profile (LP) of the Vasyugan swamp located in the south taiga biome in Western Siberia. The autonomous part of the LP is occupied by sedge-sphagnum swamp, the transitional part - by dwarf-shrub-sphagnum swamp with low pine trees and the accumulative part - by dwarf-shrub-sphagnum swamp with high pine trees. Peat deposit in autonomous and transitional parts of the LP reaches up to 3 meter thick, whereas in accumulative - up to 1 meter. Concentrations of greenhouse gases were determined by the “peepers” method, and emissions were determined by the chamber method. It was found that under different climatic conditions the concentration of CO₂ in the LP peat deposits varied in the range from 0.01 to 4.2 mmol/dm³, the concentration of CH₄ - from 0.01 to 2.19 mmol/dm³. The uneven distribution of CO₂ and CH₄ in peat deposits revealed a pattern of increasing their concentrations and decreasing the amplitude of fluctuations with depth. A reliable influence of the botanical composition of peats on the profile activity of the studied gases was determined. The temporal variability of greenhouse gas concentrations in the upper layer of LP deposits was determined to a greater extent by the weather conditions of the month: the maximum values of CO₂ concentrations were more often recorded in July, and CH₄ concentrations in May and September. CO₂ emission in LP peat deposits during the 8-year period ranged from 3.9 to 160.3 mgCO₂/(m² hour), flows from 17 to 120.5 gC/(m² year); CH₄ emission from -3.0 to 10.7 mgCH₄/(m² hour), flows from 0.5 to 6.7 gC/(m² year). The analysis of greenhouse gas emission with annual hydrothermal index considered has shown CO₂ maximum values and CH₄ minimum values in a dry year with 0.9 hydrothermal index. CH₄ flows, regardless of the hydrothermal index, consistently increased from the accumulative to the transit and then to the autonomous part of the LP.

Keywords: Tomsk region, stationary research, oligotrophic peatlands, peat deposit, CO₂ and CH₄ concentration, emission