

УДК 631.41

Потоки метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири

М.В. Глаголев^{1,2,3,4}, Д.В. Ильясов¹, И.Е. Терентьева², А.Ф. Сабреков^{1,2},
О.А. Краснов⁵, Ш.Ш. Максютлов^{2,6*}

¹Институт лесоведения РАН

143030, Московская обл., Одинцовский р-н, пос. Успенское, ул. Советская, 21

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119992, г. Москва, Ленинские горы, 1, корп. 12

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

⁵Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

⁶National Institute for Environmental Studies
305–8506 Japan, Ibaraki, Tsukuba-City, Onogawa 16–2

Поступила в редакцию 20.07.2016 г.

Проведены измерения потоков метана и диоксида углерода с использованием переносных статических камер в подзоне южной и средней тайги Западной Сибири в период с 16 по 24 августа 2015 г. Измерения осуществлялись в двух пунктах: в Бакчарском р-не Томской обл. в условиях экосистем, типичных для данного региона (на границе «олиготрофное болото–лес» и в заболоченных лесах), а также в заболоченном лесу около пос. Шапша в Ханты-Мансийском автономном округе. Наибольшие значения удельных потоков метана были зарегистрированы на участке горевшего березового леса избыточного увлажнения (медиана 6,96; нижний и верхний квартили 3,12 и 8,95 $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ соответственно). Наименьшие значения этих параметров (среди указанных выше пунктов измерений) были отмечены в лесах периодического сезонного заболачивания (медиана, нижний и верхний квартили составили $-0,08$; $-0,14$ и $-0,03 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ соответственно). Полученные данные могут быть использованы при расчете региональных потоков метана из заболоченных лесов для оценки их влияния на общий баланс парниковых газов в атмосфере.

Ключевые слова: заболоченные леса, потоки метана и диоксида углерода, парниковые газы; waterlogged forest, methane and carbon dioxide fluxes, greenhouse gases.

Введение

Двуокись углерода (CO_2) и метан (CH_4) являются основными (после водяного пара) атмосферными газами, определяющими тепловой режим нашей планеты. Интерес к изучению метана в атмосфере обусловлен его значительным влиянием на фотхимию атмосферы и изменения глобального климата. Хотя в атмосфере концентрация метана существенно меньше концентрации CO_2 , но потенциал глобального потепления CH_4 за 20-летний период гораздо выше (примерно в 39 раз), и его вклад в создание парникового эффекта составляет примерно 30% от величины, принятой для углекислого газа. В настоящее время

средняя концентрация атмосферного метана составляет 1,8 ppm. Общее количество метана в атмосфере оценивают в 4600–5000 Tg ($\text{Tg} = 10^{12} \text{ г}$). Концентрация метана мало зависит от высоты в интервале от поверхности Земли до тропопаузы (0–12 км), что обусловлено большой скоростью перемешивания по высоте (примерно 1 мес) в сравнении со временем жизни метана в атмосфере (8–12 лет [1]).

Существует предположение, что главный вклад в эмиссию метана из почв в России вносят болота [2]. Оно основано на результатах, полученных в рамках достаточно унифицированной методики с использованием как стационарных измерений, так и данных маршрутных экспедиций практически по всем основным природным зонам и типам болотных экосистем. Методология исследований заключается в экспериментальном измерении мгновенных величин удельных потоков (УП) метана камерным методом для характерных элементов болотного ландшафта. Эти данные затем можно использовать в различных модельных оценках регионального углеродного баланса с последующей

* Михаил Владимирович Глаголев (m_glagolev@mail.ru); Данил Викторович Ильясов (daniila_ilyasov@mail.ru); Ирина Евгеньевна Терентьева (kleptsova@gmail.com); Александр Фаритович Сабреков (misternickel@mail.ru); Олег Александрович Краснов (krasnov@iao.ru); Шамиль Шавратович Максютлов (shamil@nies.go.jp).

экстраполяцией на площади характерных болотных ландшафтов, полученных с помощью ГИС-картографирования из спутниковых снимков высокого разрешения в различные периоды года [2, 3]. К настоящему времени уже имеется представительная база данных с частотными распределениями величин эмиссий из характерных ландшафтов болот по всем природным зонам Западной Сибири (ЗС) [4, 5].

Предварительный учет типов почв может облегчить прогноз баланса указанных парниковых газов, поскольку в количественном отношении роль почв в газообмене CO_2 и CH_4 определена пока с недостаточной точностью и до сих пор вызывает дискуссии среди специалистов (например, [6, 7]). С одной стороны, почвы способны поглощать CO_2 из атмосферы и в дальнейшем, в процессе фотосинтеза, аккумулировать углерод в гумусе и торфе. С другой стороны, почвы (главным образом почвы болот) являются одним из основных природных источников CH_4 . В работе [8] отмечено, что, несмотря на большой разброс индивидуальных значений (полный разброс модельных оценок находится в интервале от 2,42 до 11,19 (Тг CH_4 /год), средние за 12 лет оценки эмиссии метана из болот Западной Сибири по результатам прямого моделирования дают $(5,34 \pm 0,54)$ Тг CH_4 /год; такие же оценки, полученные решением обратной задачи, дают $(6,06 \pm 1,22)$ Тг CH_4 /год. Как видно, значения оценок довольно близки. Оценка на базе экспериментальных данных, рассчитанная по эмпирической «стандартной» модели версии Vc8, равна $(3,91 \pm 1,29)$ Тг CH_4 /год [9]. В целом же оценки эмиссии метана из почв России варьируют от 8 до 40 (Тг CH_4 /год) при наиболее вероятных значениях $(16,8-17,2)$ Тг CH_4 /год [10].

Значительные усилия предпринимались для количественного учета всего многообразия почвенных

источников/стоков CH_4 [3, 11–13], а именно болот, рисовых полей и полигонов твердых бытовых отходов. Однако с теоретической точки зрения эмиссия CH_4 может наблюдаться из любых экосистем с избыточным увлажнением, например заболоченных лесов и пойм рек. К сожалению, необходимых сведений относительно мало. В основном подобные работы выполнялись в тропиках [14–16]; данных по другим регионам недостаточно [17–19] (отметим, что в работе [19] напрямую не говорится, что леса были заболочены). Полезная информация есть в обзорах [11, 20]. Тем не менее, для глобальных или хотя бы региональных оценок имеющихся данных все еще недостаточно. Задача осложняется также тем, что леса, обводненные лишь в какие-то периоды года, являются в эти периоды источником CH_4 , но в остальное время участвуют в стоке метана из атмосферы. То же самое касается и пойм рек.

В данной работе описываются результаты полевых измерений УП CH_4 и CO_2 в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири в двух пунктах: на Бакчарском болоте в Томской обл. вблизи полевого стационара Института агрохимии и почвоведения СО РАН и в заболоченном лесу около пос. Шапша в Ханты-Мансийском автономном округе.

Объекты и методы исследований

Измерения УП CO_2 и CH_4 проводились в августе 2015 г. в подзоне южной и средней тайги ЗС. В подзоне южной тайги (недалеко от с. Плотниково Бакчарского р-на Томской обл., обозначена на рис. 1 как «Трансекта») были выбраны четыре точки измерений (Тг.PWF, Тг.WF/RB_2.1, WF/RB_2.2,

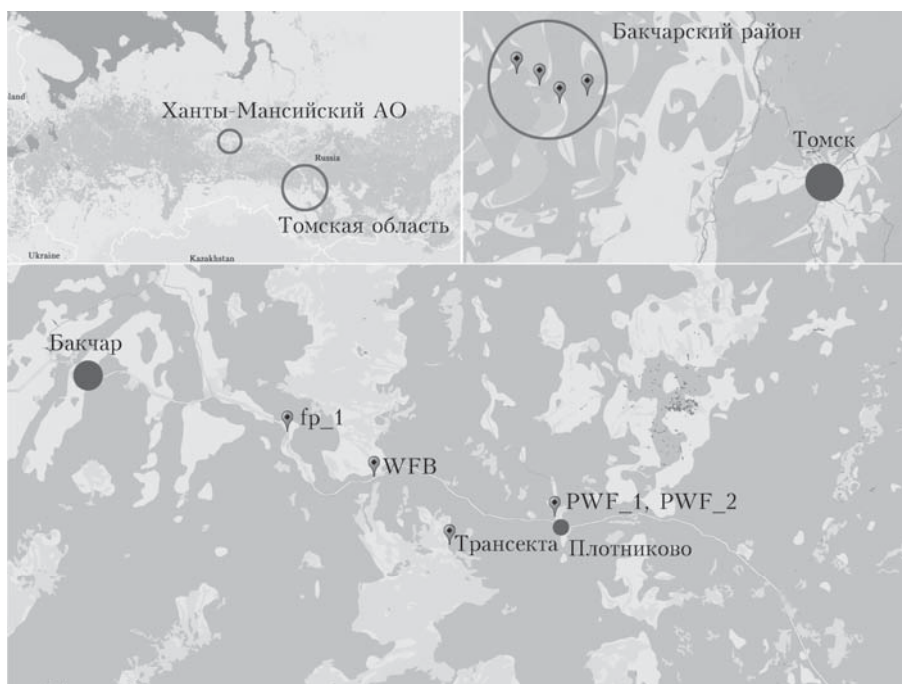


Рис. 1. Схема расположения участков проведения измерений на территории ЗС

Tr.WF/RB_1, Tr.Ryam) таким образом, чтобы они располагались на трансекте, идущей перпендикулярно от открытого олиготрофного болота с доминированием сосны (*Pinus sylvestris*) и мхов (*Sphagnum sp.*) к границе заболоченного леса с доминированием в верхнем ярусе березы (*Betula pendula*). Это позволило охватить достаточно широкий спектр условий увлажнения и смену растительных ассоциаций исследуемого экотона.

При измерениях камеры устанавливались как на возвышенных, так и на пониженных участках почвы. Первая точка (Tr.PWF, 56°49,86800' с.ш., 82°51,16700' в.д.) находилась на участке монодоминантного березового леса избыточного увлажнения; вторая (Tr.WF/RB_2.1 и WF/RB_2.2, 56°49,88917' с.ш., 82°51,08000' в.д.) и третья точки (Tr.WF/RB_1, 56°49,90167' с.ш., 82°51,07333' в.д.) — на участке березового леса близ границы олиготрофного болота с примесью сосны. Четвертая точка (Tr.Ryam, 56°49,91667' с.ш., 82°51,04500' в.д.) — на участке олиготрофного болота с примесью березы (уровень грунтовых вод (УГВ) менялся от 21 до 46 см ниже поверхности почвы, рН почвы кислый (4,2–5,2), электропроводность воды (ЕС) не превышала 100 мксим/см). Кроме того, были проведены измерения на участке березово-елового леса сезонного избыточного увлажнения (участки PWF_1.1 (56°51,744' с.ш., 83°4,282' в.д.) и PWF_1.2 (56°51,744' с.ш., 83°4,279' в.д.)) и на участке горевшего березового леса избыточного увлажнения (участок WFB, 56°54,596' с.ш., 82°41,811' в.д.) с УГВ выше поверхности почвы (–20 см). Заметим, что Бакчарская болотная экосистема в течение последних лет неоднократно исследовалась и довольно подробно описана в литературе (см., например, [21–24]).

Исследуемый лес в зоне средней тайги в основном расположен в центральной части первой надпойменной террасы реки Обь и сформирован главным образом елью (*Picea obovata*) с незначительной примесью березы и осины, высота деревьев 20–25 м. Процесс заболачивания обусловлен плохим дренажом и влажным климатом. Локальные понижения обводнены, имеется ярко выраженный микрорельеф в виде приствольных повышений, кочек и межкочий, образованных *Sphagnum magellanicum*. Почвы оглеены, глубина органического горизонта не превышает 0,5 м; рН воды кислый (3,9); удельная электропроводность — 200 мксим/см.

Измерения УП CH_4 и CO_2 проводились широко известным методом статических камер [25, 26]. Камеры представляли собой небольшие (размером $0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ м}^3$) переносимые светонепроницаемые кубы (без нижней грани) из оргстекла с принудительной вентиляцией внутри. На месте проведения измерений камеры устанавливались на металлические основания (размером $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$), которые предварительно врезались в исследуемый участок почвы. Для обеспечения герметичности закрытой при измерениях камеры использовался «водяной замок» (заполненный водой металлический «желоб» по верхнему периметру металлического основания, в кото-

рый устанавливалась камера). Отбор газа из камер проводился в шприцы объемом 12 (для CH_4) и 20 мл (для CO_2) в моменты времени $t_0 = 0$, t_1 , t_2 и t_3 из силиконового шланга, входящего в камеру через резиновый уплотнитель. Общее время экспозиции (t_3) не превышало 60 мин в случае отбора CH_4 и 15 мин (для CO_2); растительность в камере при этом оставалась нетронутой.

Анализ концентраций CO_2 производился с помощью инфракрасного газоанализатора DX-6100 (производства компании РМТ, Россия) не позднее чем через 6 ч после отбора проб воздуха из камер. Концентрация CH_4 измерялась также позднее в лабораторных условиях с помощью модифицированного газового хроматографа «ХПМ-4» (Хроматограф, Россия), оборудованного пламенно-ионизационным детектором (длина колонки 1 м, диаметр 5 мм, сорбент Совпол, 80–100 mesh, температура колонки 40 °С, в качестве газа-носителя использовался водород (скорость потока 5 мл/мин)), а также на хроматографе «Кристалл-5000» (Хроматэк, Россия) с двумя пламенно-ионизационными детекторами (длина колонок 2 м, диаметр 2 мм, сорбент Porapak Q, 80–100 mesh, температура колонок 150 °С) и азотом в качестве газа-носителя (скорость потока 10 мл/мин). Для калибровки использовались три «чистых баллона» с газовыми смесями (метан и двуокись углерода в среде синтетического воздуха) с концентрациями CH_4 , равными 1,99; 5,00 и 9,84 ppm, и концентрациями CO_2 , равными 0; 318 и 612 ppm соответственно, приготовленными в National Institute for Environmental Studies (Japan). Точность приготовления калибровочных смесей составляла ($\pm 0,01$ ppm).

Одновременно с отбором проб газов на исследуемых участках измерялись такие физико-химические параметры окружающей среды, как температура почвы на глубинах 0; 5; 15; и 45 см (термодатчики THERMOCHRON iButton DS 1921G, DALLAS Semiconductor, США), рН и удельная электропроводность грунтовых вод (датчик Kelilong PHT-028, Kelilong Electron, Китай) и влажность почвы общепринятым весовым методом [27]. Кислотность и электропроводность воды были измерены только в тех случаях, когда УГВ не опускался ниже 50 см (длина металлической трубки-зонда). Также были составлены ботанические описания участков измерений.

Удельные потоки вычислялись методом линейной регрессии в случае эмиссии CH_4 или CO_2 и нелинейной регрессии при поглощении CH_4 [28]. Положительные значения удельных потоков соответствуют выделению газа в атмосферу, отрицательные — поглощению. Положительные значения УГВ означают уровень грунтовых вод ниже поверхности почвы, а отрицательные значения — выше.

Результаты исследований и их обсуждение

Медиана распределения плотности вероятности УП CH_4 для обеих природных зон составила $0,02 \text{ мгС}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а 1-я и 3-я квартили — $0,03$

и 0,36 мгС/(м²·ч) соответственно. (Здесь медиана, 1-я и 3-я квартили – числовые характеристики распределения вероятностей случайной величины X такие, что X принимает с вероятностью 1/2 как значения больше медианы, так и меньше медианы; X принимает с вероятностью 1/4 значения меньше 1-й квартили и больше 3-й квартили). Распределение плотности вероятности УП, построенное методом гистограмм с интервалами равной вероятности, показано на рис. 2.

Удельные потоки метана на трансекте, как и следовало ожидать, возрастали – от поглощения на участке Tr.PWF до слабой эмиссии на участке Tr.Ryam (табл. 1). На участке Tr.PWF медиана УП CH₄ равна (–0,08 ± 0,06) мгС/(м²·ч), что сопоставимо с УП на участке PWF_1(2) (табл. 2) (периодически переувлажненный еловый лес) – (–0,02 ± 0,05) мгС/(м²·ч). На участке Tr.Ryam медиана УП CH₄ составила (0,30 ± 0,05) мгС/(м²·ч) с изменением от 0,03 мгС/(м²·ч) на повышениях (УГВ = 56 см) до 0,50 мгС/(м²·ч) на понижениях (УГВ = 37 см). Наибольший УП CH₄, равный (6,96 ± 0,74) мгС/(м²·ч), был отмечен на участке горевшего березового леса (точка WFB) (см. табл. 2),

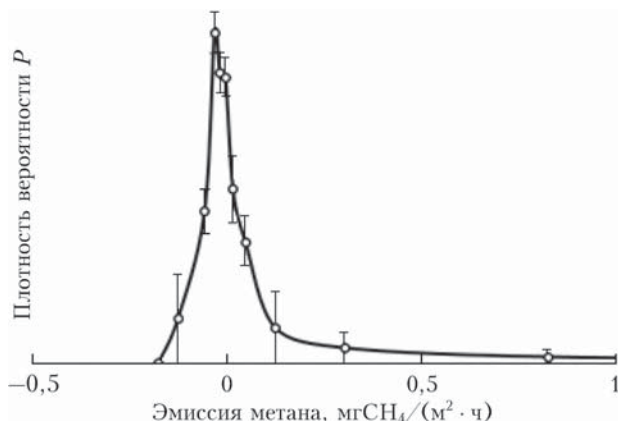


Рис. 2. Плотность вероятности УП CH₄ в заболоченных лесах

расположенного вне трансекты, и, вероятно, обусловлен высоким УГВ (–20 см). В еловом лесу в средней тайге в случае избыточного увлажнения УП CH₄ изменялся от (0,08 ± 0,04) до (1,20 ± 0,05) мгС/(м²·ч) при УГВ от 3 до –5 см, медиана потоков составила 0,46 мгС/(м²·ч), а 1-я и 3-я квартили равны 0,25 и 0,82 мгС/(м²·ч), соответственно (табл. 3).

Таблица 1

УП CH₄ и CO₂ на трансекте (Бакчарское болото, южная тайга), а также сопутствующие параметры окружающей среды

воздуха	Температура ¹ , °С				УП ± погрешность ² , мгС/(м ² ·ч)		УГВ ⁵ , см	рН	ЕС, мксим/см
	почвы на глубине, см				CH ₄	CO ₂			
	0	5	10	15					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Tr.PWF, лес периодического избыточного увлажнения, доминант – Betula pendula; 9.08.2015 г.</i>									
15,4/14,8	15,3/15,0	13,5/13,6	13	12,8/13,0	–0,041 ± 0,045(a)	379 ± 35(c)	172(0)	–	
15,5/14,9	15,9/15,3	14,5		13,3/13,4	–0,111 ± 0,057(a)	290 ± 22(c)	353(5)		
14,8/15,1	14,6/14,7	13,5/13,5		12,5	–0,150 ± 0,135(a)	489 ± 41(c)	454(10)		
15,0/15,3	15,0/15,1	14,5		13,5/13,3	–0,031 ± 0,028(a)	273 ± 14(c)	503(15)		
14,4/14,5	14,3/14,4	13,6/13,5	13,2/13,0	12,9/12,6	–0,164 ± 0,048(a)	509 ± 26(c)	–		
14,5	14,4/14,5	14,3/14,5		13,5/13,5	–0,031 ± 0,070(a)	226 ± 9(c)	–		
<i>16.08.2015 г.</i>									
18,7/18,9	16,2/16,5	15	12,5	13	–0,073 ± 0,190(a)	280 ± 19(c)	–		
					–0,092 ± 0,040(a)	399 ± 122(c)			
18,7/19,0	17	15,5/15,5	13	12,5	–0,040 ± 0,024(a)	175 ± 5(b)(c)			
20,2/19,6	17,2/16,7	15,9/15,1	13,2/12,5	13,6/13,0	–0,028 ± 0,084(a)	566 ± 181(c)			
20,2/19,7	17,2/16,8	15,9/15,2			–0,153 ± 0,250(a)	471 ± 208(c)			
20,4/19,9	17,9/17,5	15,9/15,5	13,8/13,0	13,2/12,5	–0,085 ± 0,006(a)	429 ± 163(c)			
<i>Tr.WF/RB_1, лес периодического избыточного увлажнения на границе с сосново-кустарниково-сфагновым сообществом, доминанты: Betula pendula, Pinus sylvestris; 16.08.2015 г.</i>									
20,4/19,5	18,2/18,0	15,6/15,8	13,5/13,6	13	0,260 ± 0,051(b)	374 ± 20(c)	26,5	4,7	70
					1,322 ± 0,579(c)	491 ± 16(c)			
20,4/19,6	19,1/19,0	14,0/14,1	13,0/13,1	12,5	0,164 ± 0,058(c)	172 ± 48(c)			
	17,8/18,0	15,7/15,5	13,9/13,5	13,4/13,0	0,025 ± 0,047(b)	304 ± 28(c)			
19,6/19,9	17,7/18,0	15,8/15,5	14,0/13,5	13,5/13,0	0,775 ± 0,334(c)	479 ± 97(c)			
	18,1/18,5	14,8/14,2	13,6/13	13,1/12,5	0,006 ± 0,060(c)	338 ± 11(c)			
<i>18.08.2015 г.</i>									
25,6/25,8	20,6/20,8	22,0/21,7	21,2 ³ /21,0 ³	10,7 ³ /11,0 ³	–0,017 ± 0,107(a)	331 ± 79(c)	21	4,4	40
25,5/25,8					–0,022 ± 0,018(a)	149 ± 32(c)			
	21,5/21,8	17,5/18,0	13,1 ³ /13,2 ³	10,6 ³ /10,9 ³	0,050 ± 0,049(b)	622 ± 152(c)			
24,8/24,6	20	23,0/22,9	22,1 ³ /22,0 ³	10,53	–0,029 ± 0,081(a)	174 ± 31(c)			
		23			–0,042 ± 0,080(a)	130 ± 24(c)			
24,8/24,5	21	17	13,03		–0,001 ± 0,092(a)	461 ± 191(c)			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Tr.WF/RB_2.1(2.2), лес периодического избыточного увлажнения близ границы с сосново-кустарниково-сфагновым сообществом, доминанты: Betula pendula, Pinus sylvestris; 18.08.2015 г.</i>									
23,2/23,5	20,4/20,5	24	23,2 ³ /23,1	11,8 ³ /12,0 ³	0,167 ± 0,039(c)	352 ± 8(c)	37	4,9	45
	21,0/21,1	19,3/19,5	15,0 ³ /15,0	12,5 ³ /12,5 ³	0,008 ± 0,099(b)	311 ± 4(c)	46	5,5	
22,0/22,5	19,7/20,0	23,9/24,0	23,0 ³ /23,0	11,53	0,079 ± 0,046(b)	349 ± 43(c)	37	4,9	
21,9/22,4	20,18/20,5	19	15,0 ³ /15,0	12,1 ³ /12,3 ³	-0,017 ± 0,089(a)	50 ± 48(c)	46	5,5	
20,8/21,0	19	23,4/23,5	23,0 ³ /23,0	11,53	0,023 ± 0,065(b)	213 ± 46(c)	37	4,9	45
	19,43/19,5	18,5	15,0 ³ /15,0	12,03	-0,065 ± 0,029(a)	441 ± 90(c)	46	5,5	
<i>22.08.2015 г.</i>									
12,0/11,2	13,0/13,1	14,0 ³ /14,0	11,8 ³ /12,0 ³	0,052 ± 0,053(b)	630 ± 299(c)	-			
12,1/11,2	13,2/13,7	14,3 ³ /14,5	12,5 ³ /12,5 ³	-0,021 ± 0,018(a)	367 ± 135(c)	-			
12,1/-	13,2/-	14,3 ³ /-	12,5 ³ /-	0,036 ± 0,016(b)	-/-	-			
12,5/12,3	12,42/12,1	12,9/13,0	13,4 ³ /13,5	11,53	0,033 ± 0,021(c)	299 ± 36(c)	-		
	11,5/11,5		14,0 ³ /14,0	12,53	-0,029 ± 0,054(a)	200 ± 89(c)	-		
<i>Tr.Руат, сосново-кустарниково-сфагновое сообщество, доминант Pinus sylvestris; 22.08.2015 г.</i>									
14,6/13,6	14,1/14,4	14	12,03	9,53	0,359 ± 0,017(c)	194 ± 96(c)	-		
					0,495 ± 0,184(c)	180 ± 12(c)	-		
14,8/13,5	13,6/13,8		13,53	10,7 ³ /11,0 ³	0,162 ± 0,036(b)	181 ± 8(b)	-		
13,7/-	13,0/-	13,5/-	12,0 ³ /-	9,0 ³ /-	0,245 ± 0,055(b)	-/-	-		
13,7/14,2	13,0/13,1	13,5	12,0 ³ /12,0 ³	9,03	0,503 ± 0,208(c)	78 ± 12(b)	-		
13,7/14,3	13,0/13,2	13,9/14,0	13,4 ³ /13,5 ³	10,53	0,031 ± 0,050(c)	186 ± 46(c)	-		

Примечания: ¹ – температура при измерении УП CH₄/температура при измерении УП CO₂ (дается лишь одно значение, если температуры были одинаковые); ² – типы погрешности: а – доверительный интервал на уровне 95%; б – комбинированная ошибка, рассчитанная по [33]; с – стандартное отклонение; д – стандартное отклонение с учетом весов, обратно пропорциональных дисперсиям измерения концентраций газов; ³ – температура почвы измерена на глубине 45 см; ⁴ – температура почвы измерена на глубине 25 см; ⁵ – уровень грунтовых вод УГВ (положительные значения – ниже, отрицательные – выше уровня почвы) (курсивом даны значения влажности почвы (%) на глубине (см), указанной в скобках, а не УГВ; в почвоведении принято влажность выражать в % к высушенной («абсолютно-сухой») навеске, т.е. за 100% при расчете влажности принимают твердую фазу почвы, вследствие чего влажность может оказаться намного больше 100%).

Таблица 2

УП CH₄ и CO₂ на участках лесов разной степени увлажнения (южная тайга), а также сопутствующие параметры окружающей среды

воздуха	Температура ¹ , °С				УП ± погрешность ² , мгС/(м ² · ч)		УГВ ⁵ , см	рН	ЕС, сим/см
	почвы на глубине, см				CH ₄	CO ₂			
1	0	5	10	15	6	7	8	9	10
<i>PWF_1.1 и PWF_1.2, березово-еловый лес периодического избыточного увлажнения, участок «Плотниково», доминанты: Betula pendula, Sorbus sibirica; 5.08.2015 г.</i>									
15,9	17	16,1	16,7	-	-0,013 ± 0,193(a)	206 ± 6(b)	-		
					-0,023 ± 0,060(a)	227 ± 15(c)	-		
					-0,065 ± 0,081(a)	403 ± 121(c)	-		
					-0,012 ± 0,057(a)	428 ± 36(c)	-		
18,4	18,6	16,5	16,5	-	0,016 ± 0,037(c)	227 ± 33(c)	-		
					-0,064 ± 0,031(a)	509 ± 280(c)	-		
					-0,001 ± 0,070(a)	351 ± 15(c)	-		
					0,053 ± 0,035(b)	315 ± 10(c)	-		
15,5	16,7	16,5	-	-	0,061 ± 0,043(c)	353 ± 11(c)	-		
					-0,041 ± 0,063(a)	533 ± 21(c)	-		
					-0,028 ± 0,048(a)	471 ± 31(c)	-		
					-0,065 ± 0,058(a)	467 ± 29(c)	-		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>WFB, горевший березовый лес избыточного увлажнения, участок «Бакчарское болото», доминанты: Betula pendula, Calla palustris; 24.08.2015 г.</i>									
17,9/18,8	14,6/14,9	14,5	12,5 ³ /12,6 ³	11,6 ³ /11,8 ³	6,839 ± 1,155(b) 3,341 ± 0,404(c)	42 ± 19(c) 40 ± 10(c)	-20	-	-
17,9/18,8	15,3/15,5	14,8/15,0	13,6/13,8	11,5	9,419 ± 3,442(c)	174 ± 23(c)			
17,3/17,1	13,8/14,0	14	12,1/12,2		8,395 ± 1,642(a)	152 ± 41(a)			
	14,7/14,9	14,5/14,5	13,5/13,5		1,599 ± 0,132(c)	132 ± 56(c)			
14,5/15,1	13,2	13,8/14	12		10,936 ± 0,762(b)	116 ± 6(c)			
14,5/-	13,2/-	13,8/-	12,0/-	11,5/-	8,945 ± 1,499(c)	127 ± 89(b)			
14,5/15,1	13,8/14,1	14,4/14,5	13,5/13,5	11,5	5,623 ± 0,356(c)	-/-			
					6,987 ± 0,71	57 ± 7(a)			
10,1/11,6	12,5/12,9	13,2/13,5	12		9,699 ± 2,36(c)	118 ± 48(c)			
					7,174 ± 0,851(c)	50 ± 7(c)			
				2,473 ± 0,151(c)	80 ± 41(c)				
10,1/-	13,0/-	13,9/-	13,5/-	11,5/-	6,925 ± 2,157(b)	87 ± 5(c)			
10,1/-	13,0/-	13,9/-	13,5/-	11,5/-	8,971 ± 0,666(c)	174 ± 23(b)			
<i>Точка fr_1, дренированный березовый лес, участок «Плотниково», доминант Betula pendula; 14.08.2015 г.</i>									
19,4/19,5	16,59/16,5	15,5/15,6	14,8/15,0	13,5	0,130 ± 0,060(a)	298 ± 14(c)	51(0)	-	
18,9/19,0	16,44/16,5	15,5/15,5	14,5		0,053 ± 0,045(a)	300 ± 10(c)	38(5)		
					0,070 ± 0,087(a)	271 ± 96(c)	35(10)		
					0,070 ± 0,087(a)	271 ± 96(c)	35(15)		

Примечание. См. примечание к табл. 1.

Таблица 3

УП CH₄ на участке «Шапша» (точки Sh.WFor.1.1–1.10, средняя тайга, 27.08.2015 г.), а также сопутствующие параметры окружающей среды

воздуха	Температура ¹ , °C			УП CH ₄ ± погрешность, мгС/(м ² · ч)	УГВ ⁵ , см	рН
	почвы на глубине, см					
	5	10	15			
<i>Еловый лес избыточного увлажнения, доминанты: Picea obovata, Carex sp., Sphagnum magellanicum</i>						
11,1/-	9,54/-	9,0/-	8,5 ⁴ /-	0,238 ± 0,017(d)	-3	3,9
10,6/-	9,39/-	8,8/-	8,4 ⁴ /-	0,600 ± 0,022(d)		
				0,081 ± 0,042(d)		
10,3/-	9,25/-			0,890 ± 0,008(d)		
				0,235 ± 0,017(d)		
9,6/-	8,99/-			0,563 ± 0,030(d)		
				1,152 ± 0,025(d)		
8,8/-	8,7/-	0,302 ± 0,061(d)				
		1,201 ± 0,051(d)				
				0,362 ± 0,026(d)	3	

Примечание. См. примечание к табл. 1.

Известно, что УП CH₄ сильно коррелирует с влажностью почвы [18]. Поэтому полученные небольшие величины УП CH₄ вполне естественны. Во-первых, УГВ был существенно ниже поверхности почвы для большей части исследованных экосистем, в результате чего образование CH₄ ингибировалось, а условия для его потребления были благоприятными.

Во-вторых, из-за отсутствия мощного торфяного горизонта, депонирующего влагу, условия увлажнения в заболоченных лесах менее стабильны, чем в болотах. Резкие смены гидрологических ус-

ловий в виде чередования периодов затопления и засухи замедляют восстановление активности метаногенов.

Литературные данные показывают, что в лесах избыточного увлажнения (табл. 4) в зависимости от условий увлажнения и других факторов (микрорельеф, сезон, тип экосистемы) УП CH₄ могут колебаться от -0,67 до +17,1 мгС-CH₄/(м² · ч). Для сравнения отметим, что УП CH₄ в лесах с отсутствием избыточного увлажнения изменяются от (-2,26 ± 0,17) до -0,02 мгС-CH₄/(м² · ч) [18, 29, 30, 34, 35].

УП CH₄ в лесах избыточного увлажнения

Объект	УП CH ₄ , мгС/(м ² · ч)	Источник	Примечание
Затопленные леса в бассейне р. Амазонка	3,4	Devol et al.	Исследования опубликованы в 1988 г., ссылку см. в [15]
	6,0	Bartlett et al.	
Леса Центральной Африки в бассейнах рек Конго и Убанги	0,3 ± 17,1	[15]	Затопленные леса (УГВ от -10 до -40 см)
	0,04 ± 0,24		Леса на влажных почвах (УГВ от 10 до 20 см)
	-0,03 ± -0,14		Леса на сухих почвах (УГВ более 1 м)
Леса Центральной Африки к ЮЗ и З от г. Имфондо	0,19 или 0,67 (в зависимости от метода)	[15]	Измерения выполнялись двумя вариантами градиентного метода в затопленном лесу (футпринт ~ первые сотни м ²); доля площади затопленной почвы ~ 1/3
Леса Центральной Африки к СВ и С от г. Браззавиль	3,2 ÷ 6,5		Во влажный сезон (в среднем над территорией много большей сотен м ²)
	2,4 ÷ 4,9	В сухой сезон (в среднем над территорией много больше сотен м ²)	
Леса в Пуэрто-Рико (18°18' с.ш., 65°50' з.д.)	3,1 ± 1,6 ¹⁾	[16]	Табебуйевый (<i>Tabebuia rigida</i>) лес
	0,010 ± 0,008 ¹⁾		Цирилловый (<i>Cyrilla racemiflora</i>) лес
	-0,015 ± 0,002 ¹⁾		Лес свечных деревьев (<i>Dacryodes excelsa</i>)
Еловый (<i>Picea abies L.</i>) лес, Дания	от -0,001 ± 0,005 ¹⁾	[17]	Данные с Fig. 6 в [17]
	до -0,030 ± 0,004 ¹⁾		
Сосновый лес (39°55' с.ш., 74°35' з.д.)	0,032 ± 0,008 ²⁾	[18]	Повышение (УГВ = 7 м)
	-0,046 ± 0,007 ²⁾		Понижение (УГВ ± 5 см)
Пойменный ольховый лес (периодически затопляемый)	от -0,67 до 0,60	[31]	УП CH ₄ в мгС/(м ² · сут). Участки расположены на Аляске, США (64°45' с.ш., 148°18' з.д.)
Пойменный еловый лес (периодически затопляемый)	-0,29 ± 0,02 ³⁾		

Примечание. После «±» даны: ¹⁾ стандартные ошибки; ²⁾ стандартные отклонения; ³⁾ нет данных о типе ошибки.

Дыхание мохово-травяного яруса и почвы (далее для краткости ДыМоТЯП), т.е. эмиссия CO₂ при отсутствии фотосинтеза, изменялось от (174 ± 32) на участке Тг.WF/RB_1 до (414 ± 142) мгС/(м² · ч) на участке Тг.PWF. Можно отметить отрицательную корреляцию между скоростью эмиссии метана и параметром ДыМоТЯП (рис. 3). В точке WFB с наибольшими средними УП CH₄, равными (6,96 ± 0,7) мгС/(м² · ч) (см. табл. 2), параметр ДыМоТЯП был наименьшим ((68,6 ± 8,9) мгС/(м² · ч)). И наоборот, в точке Тг.PWF УП CH₄ был минимальным ((-0,08 ± 0,06) мгС/(м² · ч)) (см. табл. 3), а параметр ДыМоТЯП — максимальным (414 ± 142) мгС/(м² · ч).

Полученные величины неплохо согласуются с имеющимися литературными данными. Например, в работе [32], в аналогичных экосистемах южной тайги европейской части РФ, ДыМоТЯП, измеренное в ельнике в течение 1993 и 1995–1997 гг., составило соответственно 207, 130, 217 и 104 мгС/(м² · ч). Для сравнения, у нас на участке Тг.PWF ДыМоТЯП елового леса периодически избыточного увлажнения имело тот же порядок величины и варьировало от (206 ± 6) до (533 ± 21) мгС/(м² · ч). Разница может быть следствием более интенсивного дыхания почвенно-растительного яруса в южной тайге, малого количества наших измерений, а также межгодовой изменчивости средней скорости эмиссии CO₂.

Интересно, что измеренные нами значения параметра ДыМоТЯП не слишком заметно отличаются от величин, полученных в тропических лесах. Так, в [15] приводятся данные для лесов в бассейнах рек Конго и Убанги (Центральная Африка): (110 ± 57) для затопленных, (93 ± 11) для влажных и (80 ± 9) мгС/(м² · ч) для сухих лесов. Там же цитируются работы других исследователей по дождевым лесам Амазонии, где наблюдались значения, равные 108 и 176 мгС/(м² · ч).

Ранее Ambus P. и Christensen S. [17], изучив ряд экосистем, в которых возможно временное заболачивание, сформулировали следующее методически важное предположение: в экосистемах временного заболачивания расчет суммарного потока с территории необходимо производить с учетом топографии ландшафта. В этом случае для корректной оценки потока с помощью камерного метода необходимо не только вести измерения на затопленных участках, но и дополнительно включать в описание исследовательского полигона данные об относительных высотах почвы и уровнях воды во время затопления. К сожалению, несмотря на то что авторы изучали в том числе и леса, окончательную формулировку своего предположения они дали для ряда экосистем, среди которых лесов уже не оказалось. Приводимые же здесь наши результаты показывают, что и в лесах, подверженных заболачиванию,

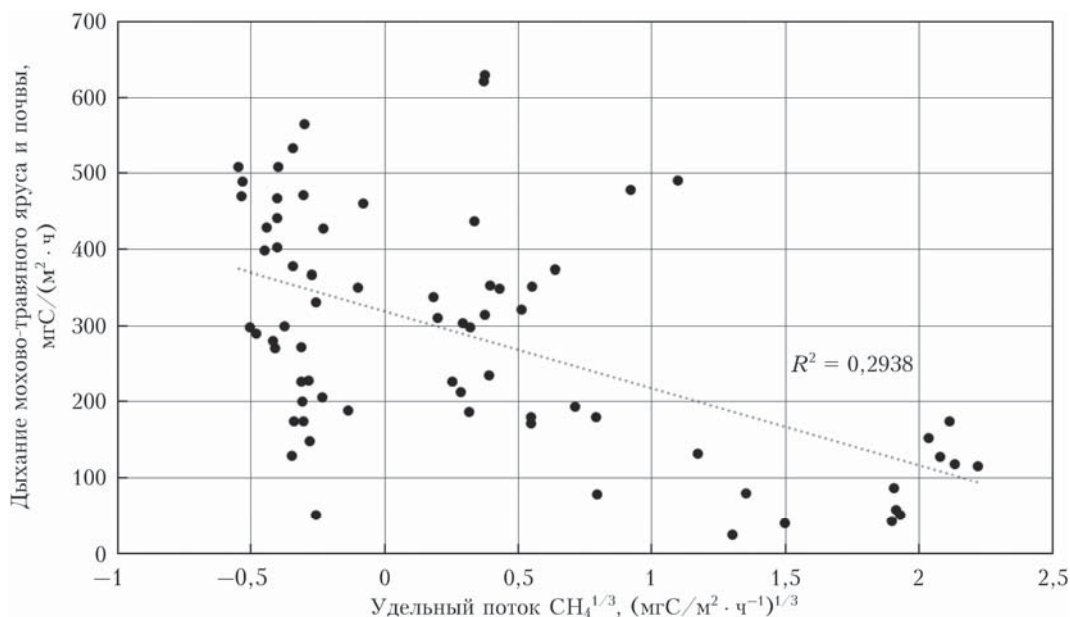


Рис. 3. Зависимость между УП CH_4 и УП CO_2 (без учета точки Sh.WFor, где эмиссия диоксида углерода не измерялась). Для лучшей читаемости графика по оси абсцисс отложен не сам удельный поток CH_4 , а кубический корень из него

наблюдаются как поглощение, так и выделение метана. Это позволяет распространить указанный подход на леса — по крайней мере, на те, которые находятся на окраине болот.

Чтобы увеличить точность прогноза потоков при измерениях на таких почвах, необходимо производить измерения с как можно большими возможными пространственным и временным разрешениями [17]. Действительно, при единичных измерениях в течение сезона вполне может оказаться, что именно в данный момент эмиссии нет, но это вовсе не значит, что ее на данном участке не бывает вообще. По-видимому, при невозможности организации таких подробных (в пространстве и времени) измерений их можно отчасти заменить расчетом: зная топографию и гидрологию местности для каждой точки лесов временного заболачивания, можно выяснить, сколько времени и в какие сезоны она пребывает в переувлажненном или относительно сухом состоянии.

Авторы выражают искреннюю благодарность начальнику стационара «Плотниково» ИПА СО РАН канд. биол. наук Б.А. Смоленцеву и директору этого института д-ру биол. наук А.И. Сысо за любезно предоставленную возможность работы на вышеуказанном стационаре.

Работа была поддержана грантами РФФИ № 15-05-07622 и 15-44-00091, а также BIO-GEO-CLIM № 14.B25.31.0001. Ш.Ш. Максюттов был поддержан грантом 2A1202 Environment Research and Technology Development Fund (Ministry of the Environment, Japan).

1. Кароль И.П. Оценки характеристик относительного вклада парниковых газов в глобальное потепление климата // Метеорол. и гидрол. 1996. № 11. С. 5–12.
2. Terentieva I.E., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Sabrekov A.F., Maksyutov Sh.Sh. Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery:

Implications for methane emissions // Biogeosciences. 2016. V. 13, N 16. P. 4615–4626.

3. Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клептова И.Е., Мачида Т., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана из болотных комплексов тайги Западной Сибири // Почвоведение. 2014. № 1. С. 58–70; Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov Sh.Sh. Methane Emission from Mires of the West Siberian Taiga // Eurasian Soil Sci. 2013. V. 46, N 12. P. 1182–1193.
4. Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Летне-осенняя эмиссия CH_4 естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестн. МГУ. Почвоведение. 2008. № 2. С. 24–36.
5. Глаголев М.В. Эмиссия CH_4 болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: Дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2010.
6. Глаголев М.В., Филиппов И.В. Ответ А.В. Смагину: III. О метанотрофном фильтре и конвективной разгрузке в атмосферу // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2015. Т. 6, № 1(11). С. 42–54.
7. Курганова И.Н., Кудеяров В.Н. Возможен ли значительный положительный дисбаланс круговорота углерода (сток) на территории России? // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2015. Т. 6, № 1(11). С. 32–35.
8. Bohn T.J., Melton J.R., Ito A., Kleinen T., Spahni R., Stocker B.D., Zhang B., Zhu X., Schroeder R., Glagolev M.V., Maksyutov Sh., Brovkin V., Chen G., Denisov S.N., Eliseev A.V., Gallego-Sala A., McDonald K.C., Rawlins M.A., Riley W.J., Subin Z.M., Tian H., Zhuang Q., Kaplan J.O. WETCHIMP-WSL: Intercomparison of wetland methane emissions models over West Siberia // Biogeosciences. 2015. V. 12, N 11. P. 3321–3349.
9. Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov Sh., Machida T. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6, N 4. P. 045214.
10. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. Ответ А.В. Смагину: II. Углеродный баланс России // Динамика окружаю-

- щей среды и глобальные изменения климата. 2014. Т. 5, № 2. С. 50–70.
11. Bartlett K.B., Harriss R.C. Review and assessment of methane emissions from wetlands // *Chemosphere*. 1993. V. 26, N 1–4. P. 261–320.
 12. Boeckx P., van Cleemput O. Flux estimates from soil methanogenesis and methanotrophy: Landfills, rice paddies, natural wetlands and aerobic soils // *Environ. Monit. Assess.* 1996. V. 42. P. 189–207.
 13. Глаголев М.В., Клепцова И.Е. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Аа2) для Западной Сибири // *Вестн. Том. гос. пед. ун-та*. 2009. № 3. С. 77–81.
 14. Devol A.H., Richey J.E., Forsberg B.R., Martinelli L.A. Seasonal dynamics in methane emissions from the Amazon River floodplain to the troposphere // *J. Geophys. Res. D*. 1990. V. 95, N 10. P. 16417–16426.
 15. Tathy J.P., Cros B., Delmas R.A., Marengo A., Servant J., Labat M. Methane emission from flooded forest in Central Africa // *J. Geophys. Res. D*. 1992. V. 97, N 16. P. 6159–6168.
 16. Silver W.L., Lugo A.E., Keller M. Soil oxygen availability and biogeochemistry along rainfall and topographic gradients in upland wet tropical forest soils // *Biogeochemistry*. 1999. V. 44, N 3. P. 301–328.
 17. Ambus P., Christensen S. Spatial and seasonal nitrous oxide and methane fluxes in Danish forest-, grassland-, and agroecosystems // *J. Environ. Qual.* 1995. V. 24, N 5. P. 993–1001.
 18. Aronson E.L., Vann D.R., Helliker B.R. Methane flux response to nitrogen amendment in an upland pine forest soil and riparian zone // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. P. G03012.
 19. Березина Е.В., Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Лаврова О.В., Беликов И.Б., Шумский Р.А. Оценка биогенных эмиссий CH₄, CO₂ и сухого осаждения O₃ по измерениям ²²²Rn в экспедициях TROICA // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2014. Т. 50, № 6. P. 663–674.
 20. Глаголев М.В. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH₄ и CO₂ из болот России // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. Т. 1, № 2. С. 5–57.
 21. Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Динамика летне-осенней эмиссии CH₄ естественными болотами (на примере юга Томской области) // *Вестн. МГУ. Почвоведение*. 2007. № 1. С. 8–14.
 22. Краснов О.А., Maksyutov Sh., Глаголев М.В., Катаев М.Ю., Inoue G., Надеев А.И., Шелевой В.Д. Автоматизированный комплекс «FLUX-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода // *Оптика атмосфер. и океана*. 2013. Т. 26, № 12. С. 1090–1097.
 23. Краснов О.А., Maksyutov Sh.Sh., Давыдов Д.К., Фофанов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. Мониторинг эмиссии метана и двуоксида углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.) // *Оптика атмосфер. и океана*. 2015. Т. 28, № 7. С. 644–654.
 24. Коронатова Н.Г., Миляева Е.В. Продуктивность болотных сосняков южной тайги Западной Сибири // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2011. Т. 4. С. 269–273.
 25. Nozhevnikova A., Glagolev M., Nekrasova V., Eino-la J., Sormunen K., Rintala J. The analysis of methods for measurement of methane oxidation in landfills // *Water Sci. Technol.* 2003. V. 48, N 4. P. 45–52.
 26. Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Maksyutov Sh.Sh. 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.
 27. Доспехов Б.А., Васильев И.П., Туликов А.М. Практикум по земледелию. М.: Агропромиздат, 1987. 383 с.
 28. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва–атмосфера. Томск: Изд-во ТГПУ, 2010. 104 с.
 29. Sullivan B.W., Kolb T.E., Hart S.C., Kaye J.P., Dore S., Montes-Helu M. Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests // *For. Ecol. Manage.* 2008. V. 255, N 12. P. 4047–4055.
 30. Castro M.S., Steudler P.A., Melillo J.M., Aber J.D., Bowden R.D. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils // *Global Biogeochem. Cycles*. 1995. V. 9, N 1. P. 1–10.
 31. Gullledge J., Schimel J.P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska // *Ecosystems*. 2000. V. 3, N 3. P. 269–282.
 32. Глухова Т.В., Ковалев А.Г., Смагина М.В., Волперский С.Э. Оценка некоторых биотических компонентов углеродного цикла болот и лесов // *Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования: Матер. конф. М.: ГЕОС, 1999. С. 182–185.*
 33. Глаголев М.В., Смагин А.В. Приложения MATLAB для численных задач биологии, экологии и почвоведения. М.: МГУ, 2005. 200 с.
 34. Groffman P.M., Hardy J.P., Driscoll C.T., Fahey T.J. Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest // *Global Change Biology*. 2006. V. 12, N 9. P. 1748–1760.
 35. Hu R., Kusa K., Hatano R. Soil respiration and methane flux in adjacent forest, grassland, and cornfield soils in Hokkaido, Japan // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2001. V. 47, N 3. P. 621–627.

M.V. Glagolev, D.V. Plyasov, I.E. Terentyeva, A.F. Sabrekov, O.A. Krasnov, S.S. Maksutov. Methane and carbon dioxide fluxes in the waterlogged forests of Western Siberian southern and middle taiga subzones.

Field measurements methane and carbon dioxide fluxes have been conducted on two sites of Western Siberia in south and middle taiga on August 16–24, 2015. Static chamber method had been used. Two measurement sites were chose in Bakchar bog, Tomsk Region, for typical local ecosystems (from oligotrophic bog to enclosed forest and periodically flooded forest) and in waterlogged forest near Shapsha settlement, Khanty-Mansi Autonomous Region. Maximum methane fluxes have been measured from the overmoistening territory of burnt birch forest (median is 6.96; lower and upper quartiles are –3.12 and 9.95 mgC · m⁻² · h⁻¹, respectively). Minimum of these parameters (among the above objects) was measured in the periodic seasonal waterlogged forest (median, lower and upper quartiles are –0.08, –0.14 and –0.03 mgC · m⁻² · h⁻¹, respectively). These data may be used for estimation of regional methane fluxes from waterlogged and periodically flooded forests and for forecast of their influence on the total balance of greenhouse gases in the atmosphere.