

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 285.3 (552.578.14)

Ю. А. ФЁДОРОВ*, Д. Н. ГАРЬКУША**, Г. В. ШИПКОВА*

*Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

**Гидрохимический институт Росгидромета, г. Ростов-на-Дону

ЭМИССИЯ МЕТАНА ТОРФЯНЫМИ ЗАЛЕЖАМИ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ ПСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Обсуждаются результаты натурных экспериментов по определению эмиссии метана и его содержания в основных типах микроландшафтов верховых болот Псковской области. Концентрация метана в болотных водах в верхнем горизонте грунтов изменялась соответственно в пределах от 17 до 7600 мкл/л и от <0,01 до 33 мкг/г влажной массы, с максимальными значениями в сильно обводненных микроландшафтах переходных топей, черных мочажин грядково-мочажинного и озерах озерно-денудационного комплексов. Скорость эмиссии метана в атмосферу варьировала от <0,1 до 87,7 мг/м² в час и в целом тесно коррелировала с его концентрациями в болотных водах и поверхностном слое грунтов изученных микроландшафтов.

Ключевые слова: болотная система, микроландшафты, торфяная залежь, метан, концентрация, эмиссия.

We discuss the results from natural experiments on determination of methane emission and its content in the main types of microlandscapes of raised bogs in Pskov oblast. The methane concentration in peat waters in the upper soil horizon varied, respectively from 17 to 7600 $\mu\text{L/L}$ and from <0.01 to 33 $\mu\text{g/g}$ of wet weight, with maximum values in heavily waterlogged microlandscapes of transitional moors, black water holes of the string-bog complex and in lakelets of the lake-denudation complex. The rate of methane emission into the atmosphere varied from <0.1 to 87.7 mg/m^2 per hour and, generally, correlated closely with its concentrations in peat waters and in the surface layer of earth materials in the microlandscapes under study.

Keywords: bog system, microlandscapes, peat deposit, methane, concentration, emission.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития цивилизации одной из актуальных экологических проблем является глобальное изменение климата, обусловленное увеличением содержания в атмосфере Земли парниковых газов, среди которых вторым по значимости является метан [1–3]. Увеличение количества метана в атмосфере приводит, помимо потепления климата, к активизации процессов разрушения озонового слоя стратосферы и формированию тропосферных озоновых аномалий [3]. С начала активной антропогенной деятельности концентрация метана в атмосфере удвоилась и продолжает нарастать до сих пор [1], что побудило научное сообщество заняться инвентаризацией и оценкой существующих источников атмосферного метана и поиском путей ограничения его эмиссии.

Российской Федерацией подписан ряд международных соглашений об ограничении эмиссии метана в атмосферу Земли, что накладывает на нашу страну определенные политические и экономические обязательства. До сих пор между государствами, подписавшими Киотский протокол, и проигнорировавшими его странами идет дискуссия относительно того, как при выделении квот на выбросы парниковых газов той или иной страной учитывать двоякую роль болот в атмосферном цикле углерода, поскольку, с одной стороны, они являются резервуарами для стока диоксида углерода и, следовательно, способствуют снижению его концентрации в атмосфере, а с другой — служат мощным источником эмиссии метана в атмосферу. Подчеркнем, что авторы не являются приверженцами какого-либо одностороннего подхода к объяснению причин глобального изменения климата и стоят на

позиции, согласно которой этот феномен рассматривается как отклик глобальной экосистемы Земли на аддитивное однонаправленное воздействие на нее природных и антропогенных факторов и процессов [4].

Болота, прежде всего верховые, покрывающие огромную территорию России, — один из основных естественных источников поступления метана в атмосферу [5]. «Болотный газ» является продуктом многоступенчатого процесса деградации органического вещества пулом аэробно-анаэробных организмов, на конечной стадии которого в анаэробных условиях бактериями-метаногенами из субстратов предшествующих стадий и образуется метан. Согласно оценкам [6], вклад метана болотного происхождения в глобальную эмиссию этого газа от естественных источников составляет 25–32 %. Несмотря на огромные площади, занимаемые верховыми болотами на северо-западе европейской территории России [7, 8], натурных измерений потоков метана здесь не проводилось, что не позволяет адекватно оценить вклад болотных экосистем данной территории в эмиссию метана в региональных и глобальных масштабах.

В этой связи представляется важным изучение этого процесса в натуральных условиях с помощью метода накопительных (эмиссионных) камер, который позволяет получить результаты прямых определений потоков метана с поверхности не только водных, но и наземных экосистем, в том числе почв и болот [9–12].

Цель настоящей работы — изучение особенностей формирования метана и оценка его эмиссии микроландшафтами верховых болот на примере крупнейшей в Европе Полистово-Ловатской болотной системы и Радиловского болотного массива, расположенных на северо-западе европейской территории России.

РАЙОН РАБОТ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены на близких по генезису территориях Полистово-Ловатской болотной системы и Радиловского болотного массива. Эти болота возникли в результате заторфывания понижений и слияния отдельных заболоченных массивов, произошедших от мелководных озер, образованных талыми ледниковыми водами после отступления валдайского оледенения. Наибольшая заболоченность характерна для Полистово-Ловатской системы, имеющей ровную пониженную поверхность и водоупор в виде глинистых отложений.

Территория Полистово-Ловатской болотной системы расположена в пределах Псковской и Новгородской областей, в междуречье рек Полисть и Ловать, впадающих в оз. Ильмень (рис. 1). Систему образуют 15 слившихся олиготрофных болотных массивов Ладожско-Ильменско-Западнодвинской провинции олиготрофных грядово-мочажинных болот зоны выпуклых олиготрофных торфяников [8]. Мощная торфяная залежь, подстилаемая валунными суглинками, местами оглеенными, сложена в основном верховыми торфами со средней мощностью 3,5–5 м и степенью разложения от 10–15 % в верхних горизонтах залежи до 50–60 % — в нижних. Среди торфов преобладает магелланикум-торф, из переходных видов обычен шейхцериевый [13]. Присутствуют торфяники озерного происхождения и торфяники, возникшие на минеральных грунтах.

Основа ландшафтов Полистово-Ловатской системы — верховые болота, находящиеся в естественном, не нарушенном деятельностью человека состоянии [14, 15]. Площадь данной болотной системы составляет около 2000 км². В ее структуре доминируют водно-болотные ландшафты (от 73 до 77 %). Среди них наиболее распространены (до 36,4 % от площади болота) мохово-травяные группы топяных микроландшафтов, 88 % площади которых занимают сфагновые топи. Несколько меньше распространен грядово-мочажинный комплекс (35,8 %) с преобладанием мочажин над грядами. Заметное место принадлежит вершинным сосново-сфагновым комплексам (11 %), относящимся к лесоболотным ландшафтам. Для территории характерно наличие мелких озер и рек, большая часть прибрежных участков покрыта осоками. Широколиственные породы встречаются по окраинам верховых болот. Флора минеральных островов близка к таежной [15]. В юго-западной части Полистово-Ловатской болотной системы, где ранее велись торфоразработки, сохранилось большое количество мелиоративных канав [14]. Все эти ландшафты (водные, лесные, луговые) занимают не более 10 %.

Радиловский болотный массив находится в 90 км северо-западнее Полистово-Ловатской болотной системы (Порховский район Псковской области). Он приурочен к Хиловской низине и характеризуется обилием моренных гряд и холмов в основном песчаного и супесчаного состава. Речная сеть относится к бассейну р. Шелонь, впадающей в оз. Ильмень.

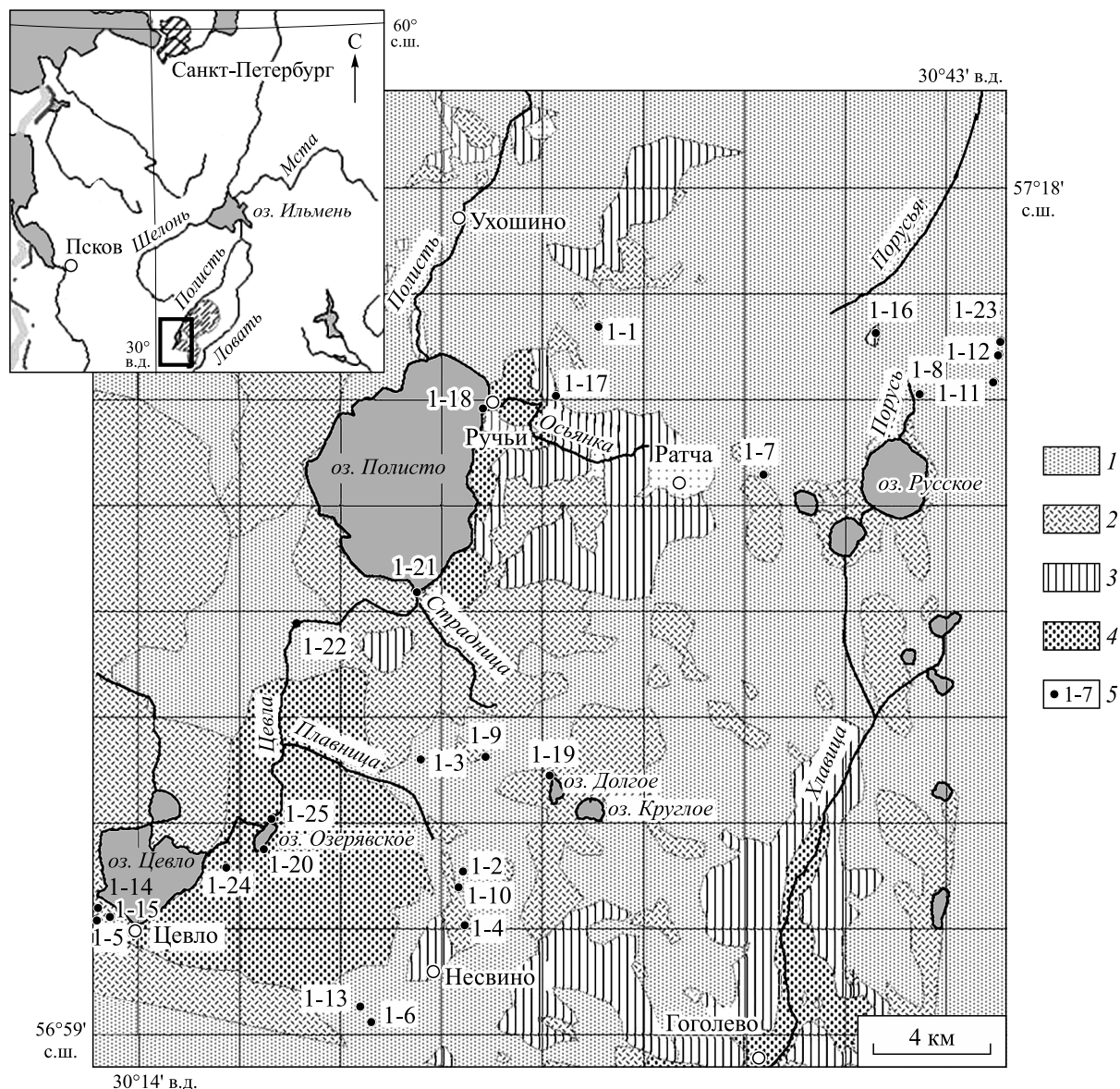


Рис. 1. Карта-схема станций наблюдения на территории Полистово-Ловатской болотной системы.

Ландшафты: 1 — водно-болотные, 2 — лесоболотные, 3 — лесные, 4 — луговые. 5 — станции наблюдений.

В основу работы положен фактический материал, собранный в летне-осенний период (конец июня—первая половина сентября) 2011–2012 гг. Исследования заключались в постановке натуральных экспериментов с целью определения скорости эмиссии метана в атмосферу, а также его содержания в воде, верхнем горизонте (0–15 см) торфа, почв и донных отложений. Для экспериментального изучения были выбраны два участка площадью 450 и 40 км², расположенные на территориях соответственно Полистово-Ловатской болотной системы (см. табл. 1, станции 1-1–1-25) и Радиловского болотного массива (станции 2-1–2-7).

Эмиссия метана с поверхности болотных микроландшафтов устанавливалась непосредственным измерением его потоков камерным методом с помощью накопительных камер-ловушек [9–12]. Вода для определения содержания метана отбиралась в поверхностном горизонте (0,1 м) в стандартные стеклянные флаконы полной вместимостью 42 мл, подготовленные для парофазного анализа [9]. Для отбора проб почв и торфа закладывались шурфы, в стенках которых с различных горизонтов мерником извлекали по 3 мл грунтов. В случаях слаборазложившегося и сильнообводненного торфа точку взятия пробы смешали на необходимый участок, где возможно было сделать прикопок.

Донные отложения отбирали в прибрежной зоне с глубинами до 0,5 м с помощью специальной трубки длиной 400 мм и диаметром 45 мм из прозрачного оргстекла с остро заточенными краями и фторопластовым поршнем. Далее с различных горизонтов керна устройством-мерником извлекали по 1,5 мл донных отложений. Полученные таким образом пробы торфа, почв и донных отложений помещали в стандартные стеклянные флаконы, заполненные до риски дистиллированной водой с консервантом. В качестве консерванта использовался насыщенный раствор сулемы (HgCl_2). Хранение и транспортировку флаконов с пробами в лабораторию осуществляли в соответствии с методикой [9]. Газохроматографическое определение метана выполнено в лаборатории Гидрохимического института методом фазово-равновесной дегазации на хроматографе «Цвет-100» с пламенно-ионизационным детектором и устройством для парофазного анализа с пневматическим способом дозирования. Нижний предел обнаружения метана в воде составляет 0,1 мкл/л, в грунтах — 0,01 мкг/г влажной пробы, суммарная погрешность — 5–10 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание метана в пробах болотных вод, отобранных с поверхности различных типов ландшафтов Полистово-Ловатской болотной системы и Радилковского болотного массива, варьирует в значительных пределах — от 17,0 до 7600,0 мкл/л (табл. 1). Максимальные концентрации (1300,0–7600,0 мкл/л) характерны для сильно обводненных черных (юngerманиевых) мочажин грядово-мочажинного комплекса и микроландшафтов переходных топей. Несколько меньше метана содержится в воде, выходящей на поверхность пушицево-сфагновых мочажин (424,0–520,6 мкл/л) грядово-мочажинного комплекса и микроландшафтов сфагновых топей (227,0–433,0 мкл/л).

Содержание метана в пробах, отобранных в верхнем 15-сантиметровом горизонте торфяной залежи и почв, изменялось в диапазоне от <0,01 до 33,0 мкг/г влажной массы (в. м.). Его максимальные концентрации приурочены к торфам озерно-денудационного комплекса (2,71–29,8 мкг/г) и топяных микроландшафтов (1,84–33,0 мкг/г), минимальные — к торфам, расположенным на приподнятых в рельефе участках (гряды и бугры), и почвам лесных и лесоболотных ландшафтов. Приподнятость в рельефе, а значит, меньшая обводненность участков, способствует большей аэрации поверхности, увеличению мощности метанотрофного барьера в поверхностном слое болотных почв и, как следствие, снижению интенсивности образования метана [16, 17].

Для воды и донных отложений озер и рек изучаемых болот Псковской области характерны повышенные концентрации метана (17,0–433,0 мкл/л и 8,31–70,0 мкг/г соответственно) по сравнению с большинством водоемов и водотоков, расположенных на северо-западе европейской территории России за пределами болотных массивов [9]. Наиболее высокие концентрации метана (425,7–433,0 мкл/л) зафиксированы в воде покрытых осоками прибрежных территорий озер и рек.

По вертикальному профилю торфяной залежи водно-болотных ландшафтов, а также донных отложений водных объектов на фоне высоких концентраций метана по всему профилю наблюдается увеличение содержания газа с глубиной, обусловленное более восстановленными условиями среды нижних горизонтов, что благоприятствует деятельности метаногенного сообщества бактерий [9, 17]. Распределение метана по почвенному профилю лесных и лесоболотных ландшафтов, напротив, наряду с низкими концентрациями метана характеризовалось уменьшением его концентраций от поверхности к нижним горизонтам, что обусловлено главным образом снижением в этом направлении количества и лабильности органических веществ, содержащихся в почвах, а также их влажности [17].

В исследованных болотных ландшафтах скорость эмиссии метана в атмосферу варьировала от <0,1 до 87,7 мг/(м²·ч), в среднем 16,3 мг/(м²·ч) (см. табл. 1). Наибольшие потоки газа наблюдались в водных и водно-болотных ландшафтах с максимальными значениями в переходных топях (31,3–87,7 мг/(м²·ч)) с выходами воды на поверхность (слой воды над торфяной залежью до 10 см). Относительно высокая скорость выделения метана зафиксирована с поверхности обводненных черных мочажин, характеризующихся угнетенным состоянием сфагновых мхов и высокой активностью микроорганизмов [17], а также озерков, озер и рек. С обводненной поверхности микроландшафтов болот и водных объектов в жаркую погоду часто выделялся газ в виде крупных схлопывающихся пузырей. Минимальные скорости выделения метана в атмосферу (от <0,1 до 1,1 мг/(м²·ч)) в большей степени характерны для аэрированных гряд грядово-мочажинного и озерно-денудационного комплексов, а также лесных ландшафтов. Скорость эмиссии метана с поверхности лесоболотных ландшафтов (2,0–7,5 мг/(м²·ч)) принимала промежуточные значения между его эмиссией с поверхности водных и водно-болотных ландшафтов и лесных ландшафтов.

**Результаты экспериментальных определений потоков метана и его содержания
в воде, торфе и донных отложениях**

№ станции	Координаты, с. ш./в. д.	Ландшафты и микроландшафты	Содержание CH ₄				Поток CH ₄ , мг/(м ² ·ч)
			вода, мкл/л	грунты, мкг/г в. м.			
				горизонт отбора, см	торф (почва)	донные осадки	
1	2	3	4	5	6	7	8
ВОДНО-БОЛОТНЫЕ ЛАНДШАФТЫ							
Грядово-мочажинные комплексы							
1-1	57°14'18"/30°28'26"	Черная мочажина с выходами воды на поверхность	7600,0	—	—	—	21,8
1-2	57°03'45"/30°27'29"		1315,7	—	—	—	12,8
1-3	57°06'29"/30°24'29"	Пушицево-сфаговая мочажина с выходами на поверхность	424,0	—	—	—	—
1-4	57°03'27"/30°27'01"	Пушицево-сфаговая мочажина сильно увлажненная, ковер	520,6	—	—	—	—
1-5	57°02'55"/30°15'04"	Гряда травяно-сфаговая	—	0–2 2–5	<0,01 0,01	—	<0,1–0,9
1-6	57°01'42"/30°24'24"	Выходы подмоховой речки на поверхность	17,3	0–2 2–5 5–10 10–15	0,04 0,28 0,46 1,30	—	1,5
Озерно-денудационные комплексы							
1-7	57°12'35"/30°34'57"	Озерко	134,3	0–2 2–5 5–10 10–15	2,71 10,1 29,8 13,2	—	18,2
1-8	57°14'06"/30°39'42"	Гряда кустарничково-сфаговая	—	0–2	0,01	—	0,7
<i>Мохово-травяные группы топяных микроландшафтов</i>							
Топи сфаговые							
1-9	57°06'51"/30°26'44"	Вахтово-шейхцериевая с выходами воды на поверхность	—	—	—	—	15,0
1-10	57°03'45"/30°27'27"	Осоково-шейхцериево-сфаговая сильно увлажненная, ковер	433,0	—	—	—	4,5
2-1	58°01'38"/29°19'01"	Вахтово-шейхцериевая сильно увлажненная, ковер	227,0	0–2 2–5 5–10 10–15	1,84 5,60 11,0 13,6	—	6,2
Топи переходные							
1-11	57°14'56"/30°41'53"	Очеретниково-шейхцериевая с выходами воды на поверхность	—	0–2 2–5 5–10	10,4 13,1 33,0	—	87,7
1-12	57°15'22"/30°42'50"	Вахтово-осоковая переходная сильно увлажненная	—	—	—	—	31,3
2-2	58°01'41"/29°18'57"	Осоковая черная мочажина с выходами воды	1300,0	—	—	—	52,1
2-3	58°00'58"/29°16'21"	Березняк осоковый, заболоченный	3132,0	0–2 2–5 5–10	1,84 2,70 5,40	—	76,8

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
ЛЕСОБОЛОТНЫЕ ЛАНДШАФТЫ							
Вершинные сосново-сфагновые комплексы							
1-13	57°01'45"/30°24'17"	Сосняк кустарничковый	—	0–2 2–5 5–10	0,05 0,04 0,06	— — —	2,0
2-4	58°01'46"/29°18'57"	Сосняк брусничник сфагновый	185,8	0–2 2–5 5–10 10–15	0,23 0,71 2,12 2,70	— — — —	7,5
2-5	58°01'34"/29°19'16"	Сосняк черничник сфагновый	—	0–2 2–5 5–10	0,13 0,02 0,03	— — —	6,9
Сосново-пушицево-сфагновые комплексы							
1-14	57°02'53"/30°14'58"	Кустарничково-пушицево-сфагновое болото, облесенное	25,7	0–2 2–5	0,11 0,34	— —	3,6
1-15	57°02'51"/30°15'17"	Сосняк травяно-сфагновый	—	—	—	—	0,9
ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ							
1-16	57°15'17"/30°38'07"	Дубрава липняковая, о. Крыман	—	0–2 2–5 5–10 10–15	0,05 0,04 0,01 0,01	— — — —	1,1
1-17	57°13'32"/30°27'50"	Березняки сфагновые	—	0–2	0,01	—	<0,1–0,6
ВОДНЫЕ ЛАНДШАФТЫ							
Озера							
1-18	57°12'52"/30°25'47"	оз. Полисто, прибрежная зона	17,0–36,4	—	—	—	1,6–10,2
1-19	57°06'29"/30°28'33"	оз. Долгое, прибрежная зона	25,7	0–2 2–5	— —	62,0 70,0	—
1-20	57°04'21"/30°19'54"	оз. Озерявское, прибрежная зона	124,0	0–2 2–5 5–10	— — —	16,0 61,7 36,5	—
2-6	58°00'58"/29°16'20"	оз. Радиловское, прибрежная зона	119,0	—	—	—	24,8
Реки							
1-21	57°09'29"/30°23'47"	Впадение р. Цевлы в оз. Полисто	113,9	—	—	—	24,1
1-22	57°07'49"/30°20'17"	р. Цевла, прибрежная зона	101,4	0–2 2–5 5–10 10–10	— — — —	17,0 30,2 42,3 49,4	—
2-7	58°00'23"/29°23'41"	р. Коломенка, прибрежная зона	142,5	0–2 2–5 5–10 10–15	— — — —	8,31 9,42 20,4 23,2	—
1-23	57°15'21"/30°42'49"	Выходы р. Порусь на поверхность	68,9	—	—	—	—
Мелиоративные пруды и каналы							
1-24	57°03'04"/30°16'50"	Дренажные каналы	134,5–254,7	0–2	—	1,92–7,44	11,5–16,2
Осочники							
1-25	57°04'42"/30°20'04"	Вблизи выхода р. Цевлы из оз. Озерявское	425,7–433,0	—	—	—	22,9–24,1

Примечание. Здесь и в табл. 2 «—» — измерения не проводились.

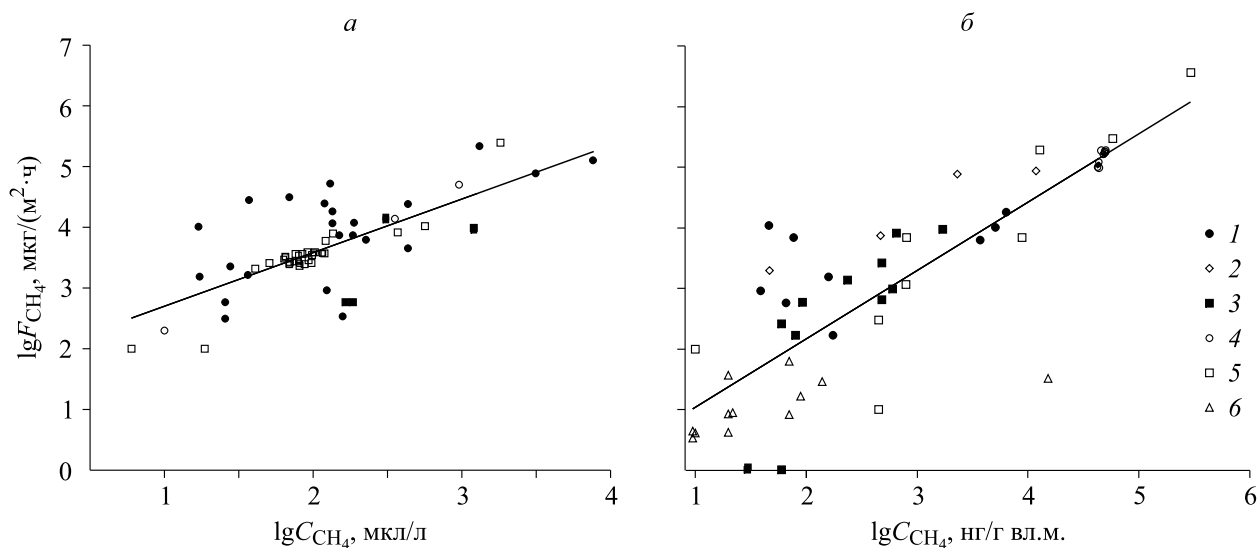


Рис. 2. Зависимость интенсивности эмиссии метана в атмосферу от его содержания в поверхностном слое воды (а) и 0–5-сантиметровом горизонте грунтов (б).

1 — Полистово-Ловатская болотная система; 2 — Радиловский болотный массив; 3 — Иласский болотный массив; 4 — очистные сооружения и иловые площадки Ростовской станции аэрации; 5 — водные объекты Ростовской области; 6 — почвы Ростовской области.

В целом отмечается тесная связь между скоростью выделения метана в атмосферу и его концентрациями в воде ($r = 0,72$; $P < 0,01$) и 0–2-сантиметровом слое грунтов ($r = 0,77$; $P < 0,01$) изученных микроландшафтов. Ранее авторами [9] в серии натурных экспериментов на водных объектах Ростовской области (реки Дон, Темерник, Мертвый Донец и Таганрогский залив) получены формулы, аппроксимирующие зависимости между потоками метана в атмосферу и его концентрациями в поверхностном слое воды и верхнем 0–5-сантиметровом горизонте донных отложений. Если нанести на приведенные в работе [9] графики данные, полученные нами в ходе исследований болотных ландшафтов Псковской области, то обнаруживается, что они очень близко ложатся к прямым, аппроксимирующим указанные зависимости (рис. 2). Данные, полученные при изучении уровня содержания метана и его потоков в атмосферу с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области [12], очистных сооружений Ростовской станции аэрации [10] и почв Ростовской области [11], тоже располагаются очень близко к этим прямым. Это свидетельствует о том, что приведенные в работе [9] формулы универсальны и могут быть использованы для прогнозных оценок эмиссии метана в атмосферу не только неглубокими водными объектами, но и такими наземными источниками, как почвы и болота, а также очистные сооружения и иловые площадки станций аэрации.

После нанесения полученных данных на график (см. рис. 2, а) уравнение, аппроксимирующее зависимость между концентрацией метана в поверхностном слое воды и его потоком в атмосферу, приобретает следующий вид:

$$\lg F_{\text{CH}_4} = 0,882 \cdot \lg C_{\text{CH}_4} + 1,821 \quad (r = 0,72; P < 0,01), \quad (1)$$

где $\lg F_{\text{CH}_4}$ — логарифм потока метана в атмосферу, мкг/(м²·ч); $\lg C_{\text{CH}_4}$ — логарифм содержания метана в воде, мкл/л.

Уравнение, аппроксимирующее зависимость между концентрацией метана в 0–5-сантиметровом горизонте грунтов (донные отложения, почвы, торф, канализационный осадок иловых площадок) и его потоком в атмосферу принимает вид (см. рис. 2, б):

$$\lg F_{\text{CH}_4} = 1,13 \cdot \lg C_{\text{CH}_4} - 0,095 \quad (r = 0,86; P < 0,01), \quad (2)$$

где $\lg F_{\text{CH}_4}$ — логарифм потока метана в атмосферу, мкг/(м²·ч); $\lg C_{\text{CH}_4}$ — логарифм содержания метана в грунтах, нг/г влажной массы.

Проведем ориентировочную экстраполяцию данных наших измерений на всю территорию Полистово-Ловатской болотной системы. Для этого предположим, что величины, характеризующие скорость эмиссии метана с поверхности изученных типов микроландшафтов, могут быть распространены

Эмиссия метана в атмосферу микроландшафтами Полистово-Ловатской болотной системы и Радилковского болотного массива

Ландшафты и микроландшафты	Площадь микроландшафта		Содержание CH ₄		Поток CH ₄ , мг/(м ² ·ч)	Общий поток CH ₄ со всей площади микроландшафта, кг/сут
	км ²	%	вода, мкл/л	грунты, мкг/г		
<i>Водно-болотные ландшафты</i>						
Грядово-мочажинные комплексные микроландшафты:						
мочажины (70 %)	502	25,1	$\frac{424,0 - 7600}{2465 (4)}$	—	$\frac{12,8 - 21,8}{17,3 (2)}$	208 430
гряды, бугры (30 %)	214	10,7	—	$\frac{< 0,01 - 0,01}{0,01 (3)}$	$\frac{< 0,1 - 0,9}{0,5 (3)}$	2568
Озерно-денудационные комплексные микроландшафты:						
озерки (10 %)	10	0,5	134,3	$\frac{2,71 - 29,8}{14,0 (4)}$	18,2	4368
ковры (67 %)	64	3,2	—	—	5,4	8294
гряды, бугры (23 %)	20	1,0	—	$\frac{< 0,01 - 0,01}{0,01 (3)}$	$\frac{\text{Не обн.} - 0,9}{0,5 (3)}$	240
Мохово-травяные группы топяных микроландшафтов:						
топи сфагновые	640	32,0	$\frac{227,0 - 433,0}{330,0 (2)}$	$\frac{1,84 - 13,6}{8,01 (4)}$	$\frac{4,5 - 15,0}{8,6 (3)}$	132 096
топи переходные	88	4,4	$\frac{1300 - 3132}{2866 (2)}$	$\frac{1,94 - 33,0}{11,1 (6)}$	$\frac{31,3 - 87,7}{62,0 (4)}$	130 944
<i>Лесоболотные ландшафты</i>						
Вершинные сосново-сфагновые комплексные микроландшафты	214	10,7	185,8	$\frac{0,02 - 2,70}{0,61 (10)}$	$\frac{2,0 - 7,5}{5,5 (3)}$	28 248
Сосново-пушицево-сфагновые комплексные микроландшафты	54	2,7	25,7	$\frac{0,11 - 0,34}{0,23 (2)}$	$\frac{0,9 - 3,6}{2,3 (2)}$	2981
<i>Водные ландшафты</i>						
Озера	28	1,4	$\frac{17,0 - 124,0}{64,4 (5)}$	$\frac{16,0 - 70,0}{49,2 (5)}$	$\frac{1,6 - 24,8}{12,2 (3)}$	8198
Водотоки (реки, мелиоративные каналы)	6	0,3	$\frac{17,3 - 254,7}{119,0 (7)}$	$\frac{1,92 - 49,4}{21,0 (10)}$	$\frac{11,5 - 24,1}{17,3 (3)}$	2491
Осочники	102	5,1	433,0	—	$\frac{22,9 - 24,1}{23,5 (2)}$	57 528
<i>Лесные ландшафты</i>						
Дубравы липняковые, березняки сфагновые и прочие	46	2,3	—	$\frac{0,01 - 0,05}{0,03 (6)}$	$\frac{< 0,1 - 1,1}{0,6 (3)}$	662
Луговые ландшафты	12	0,6	—	—	—	—
Итого	2000	100	$\frac{17,0 - 7600,0}{667,0 (24)}$	$\frac{< 0,01 - 70}{11,7 (53)}$	$\frac{< 0,1 - 87,7}{16,3 (33)}$	587 048

Примечание. В числителе приведены пределы изменения, в знаменателе — средние значения, в скобках — количество измерений; Не обн. — не обнаружено.

на однотипные микроландшафты неисследованной территории. В табл. 2 по средним значениям потока метана рассчитаны его эмиссия в атмосферу с поверхности основных типов микроландшафтов и результирующая (суммарная) ее величина с территории Полистово-Ловатской болотной системы. При расчете принято, что выделение метана с поверхности ковров озерно-денудационных комплексов соответствует его осредненному потоку с ковров сфагновых топей и составляет 5,4 мг/(м²·ч).

По нашим расчетам суммарная эмиссия метана со всей территории Полистово-Ловатской болотной системы составит ориентировочно 587 т в сутки. Наибольший вклад в суммарный поток вносят топяные (44,8 %) и грядово-мочажинные комплексные (35,9 %) микроландшафты, а в целом вклад водно-болотных ландшафтов в суммарную эмиссию составляет 83 %. На лесоболотные и водные ландшафты приходится 5,3 и 11,7 % соответственно. Доля лесных и луговых ландшафтов, занимающих 2,9 % площади болотной системы, незначительна (~0,1 %). Если пересчитать величину суточной эмиссии метана на продолжительность бесснежного периода (6 месяцев, или 180 дней с мая по ноябрь), то для Полистово-Ловатской болотной системы эмиссия метана за бесснежный период составит ~106 тыс. т (или 152 млн м³).

Скорости выделения метана в атмосферу микроландшафтами Полистово-Ловатской системы сопоставимы с данными по эмиссии метана микроландшафтами Васюганской торфяно-болотной области Западно-Сибирской низменности (14,5–34,6 мг/(м²·ч)) [5]. Сравнение данных по содержанию метана и его эмиссии в атмосферу для изученных болот Псковской области с аналогичными показателями, определенными в однотипных ландшафтах Иласского болотного массива [12], расположенного значительно севернее — свыше 1 тыс. км (Архангельская область, бассейн р. Северная Двина), показало в целом более низкие скорости эмиссии газа ландшафтами Иласского массива (до 9,84 мг/(м²·ч), в среднем 2,24) при достаточно близких его концентрациях в грунтах и болотных водах. По всей видимости, повышенная скорость потоков метана с поверхности болот Псковской области обусловлена главным образом более высокими температурами приземного воздуха и, как следствие, воды (13,0–26,5 °С) и грунтов, что благоприятно сказывается на деятельности метаногенного сообщества бактерий [4, 9, 16]. Нельзя также исключить влияние увеличения растворимости метана в воде при снижении температуры окружающей среды, что, например, по мнению [18], было причиной существенно более низких концентраций газа в воздушных потоках над заболоченными территориями Западной Сибири в вечернее время по сравнению с дневным.

Если пересчитать полученную величину эмиссии метана для Полистово-Ловатской системы на всю площадь, занятую болотами в Псковской области (~6430 км²), то эмиссия последними за бесснежный период составит 340 тыс. т. Эта величина сопоставима с эмиссией метана болотами Архангельской области (~521 тыс. т за период без снега) [12], занимающими площадь (82,6 тыс. км²), на порядок большую, чем площадь болот Псковской области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследованных микроландшафтах болот Псковской области скорость эмиссии метана в атмосферу варьировала от <0,1 до 87,7 мг/(м²·ч) (в среднем 16,3 мг/(м²·ч)), что почти на порядок превышает потоки метана с поверхности микроландшафтов северных болот европейской территории России и сопоставимо с данными по эмиссии метана микроландшафтами Васюганской торфяно-болотной области Западной Сибири.

Наибольшие потоки газа (31,3–87,7 мг/(м²·ч)) наблюдались в переходных топяных микроландшафтах с открытой водной поверхностью. Минимальные скорости выделения метана были характерны для грядово-мочажинного и озерно-денудационного комплексов, а также лесных ландшафтов. Меньшая обводненность ландшафтов способствует большей аэрации их поверхности, увеличению мощности метанотрофного барьера в поверхностном слое болотных почв и, как следствие, снижению содержания и эмиссии метана.

В целом замеренные потоки метана в эксперименте тесно коррелировали с его концентрациями в болотных водах и поверхностном слое болотных почв изученных микроландшафтов. Показано, что ранее полученные уравнения регрессии отражают связь содержания метана с его потоками в атмосферу и могут быть использованы для прогнозных оценок эмиссии метана не только водными объектами, но и такими наземными источниками, как торфяные залежи болот и почвы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (12–05–00420, НШ-5548.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Изменения** климата. Комплект информационных карточек по изменению климата. — М.: ЮНЕП РКИКООН, 2003. — 31 с.
2. **Будыко М. И., Голицын Г. С., Израэль Ю. А.** Глобальные климатические катастрофы. — М.: Гидрометеоздат, 1986. — 159 с.
3. **Бримблкумб П.** Состав и химия атмосферы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1998. — 352 с.
4. **Фёдоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Крукиер М. Л.** Влияние температуры на эмиссию метана из водных объектов (по результатам экспериментального и математического моделирования) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. — 2012. — № 6. — С. 98–100.
5. **Паников Н. С.** Таежные болота — глобальный источник атмосферного метана // Природа. — 1995. — № 6. — С. 14–25.
6. **Ehhalt D. H.** The atmospheric cycle of methane // Tellus. — 1974. — Vol. 26, N 1–2. — P. 58–70.
7. **Вомперский С. Э., Сирип А. А., Цыганова О. П. и др.** Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2005. — № 5. — С. 39–50.
8. **Кац Н. Я.** Типы болот СССР и Западной Европы и их географическое распространение. — М.: ОГИЗ, 1948. — 320 с.
9. **Фёдоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О.** Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. — Ростов н/Д; М.: Ростиздат, 2007. — 330 с.
10. **Гарькуша Д. Н., Фёдоров Ю. А., Плигин А. С.** Эмиссия метана на основных этапах технологического цикла очистки сточных вод канализации Ростовской станции аэрации (по экспериментальным данным) // Метеорология и гидрология. — 2011. — № 7. — С. 40–48.
11. **Гарькуша Д. Н., Фёдоров Ю. А., Тамбиева Н. С.** Эмиссия метана из почв Ростовской области // Аридные экосистемы. — 2011. — Т. 17, № 4 (49). — С. 223–229.
12. **Фёдоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Хромов М. И.** Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области // Изв. РГО. — 2008. — Т. 140, вып. 5. — С. 25–32.
13. **Богдановская-Гиенэф И. Д.** Закономерности формирования сфагновых болот на примере Полистово-Ловатского болотного массива. — Л.: Наука, 1969. — 186 с.
14. **Шипкова Г. В., Мартынова М. И., Фёдоров Ю. А. и др.** Экспедиционные исследования в Полистово-Ловатской болотной системе — 2011 // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 3 [Электронный ресурс]. — <http://www.science-education.ru/103-6288>
15. **Мартынова М. И., Яблоков М. С., Шипкова Г. В., Михайлова Е. А.** Современные природные комплексы окраинных лесов Полистово-Ловатского болотного массива // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. — 2010. — № 2. — С. 127–130.
16. **Глаголев М. В.** Элементы количественной теории процессов образования и потребления метана в воде // Сб. материалов III науч. школы «Болота и биосфера». — Томск: Изд-во ЦНТИ, 2004. — 274 с.
17. **Гальченко В. Ф., Дулов Л. Е., Крамер Б. и др.** Биогеохимические процессы цикла метана в почвах, болотах и озерах Западной Сибири // Микробиология. — 2001. — Т. 70, № 2. — С. 215–225.
18. **Коржов Ю. В., Езупенок А. Э., Туров Ю. П., Иванова Л. В.** Изменение концентрации метана в приземных атмосферных потоках над лесоболотным массивом Обско-Иртышской пойменной области // Материалы Шестого совещания по климатоэкологическому мониторингу. — Томск: Копир. центр, 2005. — С. 111–115.

Поступила в редакцию 15 апреля 2014 г.