

Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными экосистемами территории лицензионных участков Салымской группы месторождений Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа

Е. А. ДЮКАРЕВ^{1, 2}, А. Ф. САБРЕКОВ^{1, 3}, М. В. ГЛАГОЛЕВ^{1, 3, 4}, М. В. КИСЕЛЕВ², И. В. ФИЛИППОВ¹,
А. А. ДМИТРИЧЕНКО¹, Е. Д. ЛАПШИНА¹

¹Югорский государственный университет
628012, Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16
E-mail: dekot@mail.ru

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, Томск, Академический просп., 10/3

³Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН
119071, Москва, ул. Вавилова, 34

⁴Факультет почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова
119991, Москва, Ленинские горы, 1

Статья поступила 21.12.2021

После доработки 26.05.2022

Принята к печати 07.06.2022

АННОТАЦИЯ

В работе обобщены результаты полевых исследований по изучению потоков углекислого газа и метана в болотных экосистемах на территории лицензионных участков Салымской группы месторождений (Ханты-Мансийский АО). Наибольшие удельные потоки углекислого газа и метана наблюдаются на мезотрофных и эвтрофных болотах, характеризующихся максимальными запасами биомассы. Здесь зарегистрированы значительные отрицательные удельные потоки CO_2 ($-1161,6 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$), связанные с фотосинтезом, однако в них же велика и расходная составляющая углеродного обмена (экосистемное дыхание) (более $680 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$). Эмиссия метана достигает $23,9 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. В олиготрофных болотах в дневное время зарегистрированы удельные потоки CO_2 $-400 \div -600 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$, а в ночное $+160 \div +840 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Из повышений в олиготрофных болотных комплексах выделяется до $1,1 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$, а с понижений – до $3,9 \text{ мгCH}_4 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. Большие потоки углекислого газа и метана зарегистрированы с поверхности просек по сосново-кустарничково-сфагновому болоту, где в зависимости от наземного покрова выделение CO_2 может составлять $+46 \div +480 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$, а эмиссия CH_4 $-4,6 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$.

Ключевые слова: углеродный баланс, метан, углекислый газ, болото, эмиссия, фотосинтез, дыхание почвы.

© Дюкарев Е. А., Сабреков А. Ф., Глаголев М. В., Киселев М. В., Филиппов И. В., Дмитриченко А. А., Лапшина Е. Д., 2022

ВВЕДЕНИЕ

Наземные экосистемы участвуют в регулировании газового состава атмосферы, водного баланса биосферы и биологического разнообразия [Доктуровский, 1932; Боч, Мазинг, 1979; Лисс и др., 2001; Baird et al., 2013]. Торфяные болота являются наиболее значимым на суше долговременным накопителем атмосферного углерода [Иванов, Новиков, 1976; Вомперский и др., 2005; Rydin, Jeglum, 2015]. По разным оценкам, болотные экосистемы содержат 120–455 млрд т углерода [Ефремов и др., 1994; Пулы..., 2007; Букварева, 2010], из них свыше 70 млрд т аккумулировано в болотах Западной Сибири [Sheng et al., 2004]. Торфяные болота в естественном состоянии являются эффективным стоком для углекислого газа (CO_2) и значительным источником метана (CH_4) [Yu, 2011; Лисс, Березина, 1981]. Суммарное поглощение CO_2 болотными экосистемами наблюдается вследствие преобладания количества CO_2 , аккумулируемого растительностью в процессе фотосинтеза, над выделением в атмосферу в процессе дыхания растений и гетеротрофного дыхания [Пулы..., 2007]. Метан образуется при анаэробном разложении органического вещества почвы [Saunois et al., 2016]. Метан – ключевой парниковый газ для атмосферы Земли. По величине потенциала глобального потепления метан превосходит углекислый газ в 28 раз. Общее радиационное воздействие (форсинг) CH_4 составляет треть от форсинга всех долгоживущих парниковых газов, что делает метан третьим по важности парниковым газом после водяного пара и углекислого газа [Ciais et al., 2013]. Также он принимает важное участие в ряде значимых фотохимических реакций в различных слоях атмосферы Земли [Seinfeld, Pandis, 2006]. Согласно оценкам МГЭИК [Ciais et al., 2013], выбросы метана от ненарушенных болот составляют 61–82 % от всех природных источников метана.

Повышение температуры приземного воздуха и снижение уровня воды вызывают высыхание торфа, повышение температуры и аэрации, что способствует росту выбросов CO_2 , но снижению эмиссии метана [Baird et al., 2013; Второй оценочный доклад ..., 2014]. Одни и те же экосистемы торфяников в разные годы могут служить как источником, так и поглотителем углерода [Parazoo et al., 2018].

В результате изменения климата [IPCC, 2013; Второй оценочный доклад..., 2014] или антропогенного воздействия накопленные запасы торфа могут частично перейти в атмосферу в виде CO_2 или CH_4 [Карелин, Замолодчиков, 2008; Анисимов и др., 2012]. На территории лицензионных участков Салымской группы месторождений ведется комплекс работ по освоению нефтяных месторождений, включая доразведку и разработку, что создает повышенную антропогенную нагрузку на окружающую среду. Основные антропогенные воздействия включают вырубку леса и расчистку площадок под места бурения, прокладку дорог и теплотрасс, прямые и косвенные выбросы в атмосферу парниковых газов. Однако площадь антропогенно преобразованных территорий невелика.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение удельных потоков углекислого газа и метана в болотных экосистемах на территории лицензионных участков Салымской группы месторождений (Ханты-Мансийский АО), выявление наиболее активных (с точки зрения поглощения парниковых газов из атмосферы) болотных экосистем.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Территория исследования

Территория исследования включала три нефтегазовых месторождения (Верхнесалымское, Вадельпское и Западно-Салымское) Салымской группы месторождений (СГМ), разрабатываемые компанией “Салым Петролеум Девелопмент Н. В.” (СПД) в 2019 г. Месторождения расположены в Нефтеюганском районе Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО-Югра) (рис. 1) и на период исследования включали 1200 скважин, 500 км промысловых трубопроводов, газотурбинную электростанцию и прочие объекты инфраструктуры, постоянные и временные лагеря, офисы и цеха (salympetroleum.ru).

Растительный покров бассейна р. Салым в пределах лицензионных участков СГМ площадью 1484 км² представлен в основном лесными (712 км²) и болотными (770 км²) экосистемами [Инвентаризация..., 2015]. Лесные насаждения образованы преимущественно смешанными темнохвойно-мелколиственными,

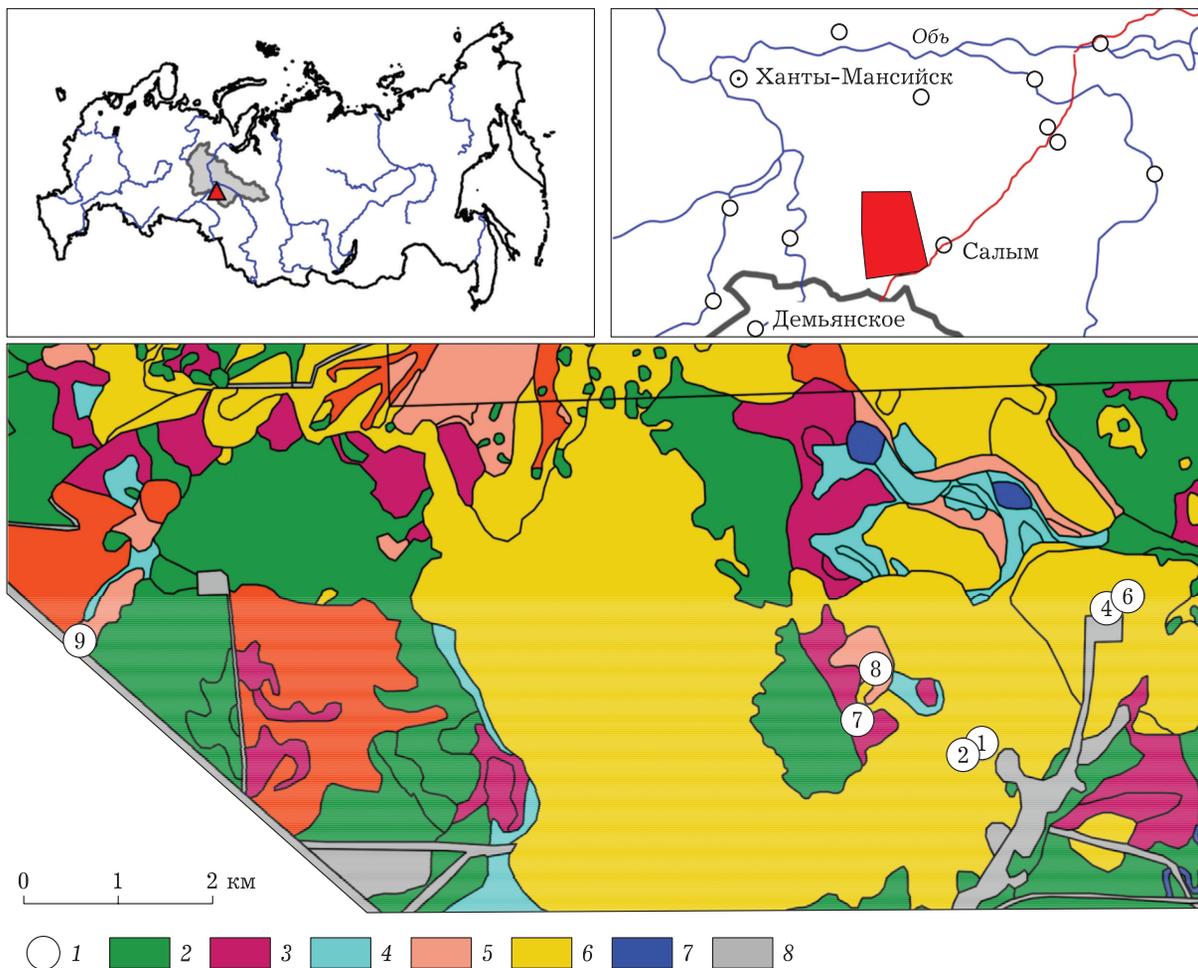


Рис. 1. Карта-схема наземного покрова ключевого участка Верхнесалымского месторождения СГМ. 1 – пункты наблюдений; 2 – леса; 3 – заболоченные леса и лесные болота; 4 – низинные (эвтрофные) болота; 5 – переходные (мезотрофные и мезоолиготрофные) болота; 6 – верховые (олиготрофные) болота; 7 – водные объекты; 8 – нарушенные участки: вырубки, просеки, дороги [Инвентаризация..., 2015]

березовыми и осиновыми лесами (300 км², или 42 % от площади лесов), находящимися на разных стадиях послепожарного восстановления, а также коренными зональными пихтово-елово-кедровыми мелкотравно-зеленомошными лесами (373 км², или 52 % от площади лесов), характерными для плакорных местообитаний средней тайги Западной Сибири. Антропогенно преобразованные участки (вырубки, просеки, кустовые площадки) занимают незначительные площади (2 км²).

Болота на территории СГМ распространены столь же широко, как и зональная лесная растительность, и отличаются большим фитоценотическим разнообразием. По типу водно-минерального питания болотные сообщества относятся к трем типам растительности: олиготрофной, мезотрофной и эвтроф-

ной, соответствующей верховым (409 км²), переходным (130 км²) и низинным (231 км²) болотам. В зависимости от степени обводненности болотных местообитаний и степени выраженности древесного яруса болотные сообщества относят к древесной, древесно-моховой, древесно-травяной или моховой группе [Шепелева и др., 2008].

Верховые болота занимают 53 % от площади болот, господствуя на водораздельных равнинах и надпойменных речных террасах. К дренированным участкам верховых болот приурочены сосново-кустарничково-сфагновые сообщества – рямы (120 км², или 16 % от площади болот). На склонах обширных олиготрофных болотных систем развиваются грядово-мочажинные, грядово-топяные и грядово-озерковые болотные комплексы (46 км²,

или 6 % от площади болот). Сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые и кустарничково-пушицево-сфагновые сообщества (открытые и с редкой болотной сосной) преобладают среди болот без древесного яруса (146 км², или 19 % от площади болот). Озера и озерки олиготрофных болотных комплексов занимают значительные области (81 км², или 11 % от площади болот).

Переходные (мезотрофные) болота распространены менее широко (17 % от площади болот). Обычно они развиваются по периферии олиготрофных болотных массивов, в истоках ручьев, дренирующих олиготрофные верховые болота, по берегам озер. Переходные болота представлены березово-сосновыми осоково-сфагновыми (98 км², или 13 % от площади болот) и осоково-кустарничково-сфагновыми (32 км², или 4 % от площади болот) фитоценозами с преобладанием мезотрофных и мезоолиготрофных видов сфагновых мхов.

На территории СГМ низинные болота (30 % от площади болот) представлены осоковыми, хвощовыми, осоково-гипновыми, сосново-вахтово-сфагновыми (70 км², или 9 % от площади болот) и древесными – темной хвойными и березовыми сограми (161 км², или 21 % от площади болот). Они развиты в долинах рек и ручьев, у подножия речных террас, в местах выходов грунтовых вод и отличаются богатством видового состава с участием редких видов растений.

Климат

По данным метеорологической станции Демьянское (WMO ID28076), средняя годовая температура воздуха за период с 1988 по 2018 г. составила 0,7 °С [Булыгина и др.]. Кривая годового хода температуры воздуха имеет простой вид с максимумом в июле (18,3 °С) и минимумом в январе (–20,1 °С). Самым теплым являлся 1995 год: средняя температура была равна 1,5 °С, 2010 год – самым холодным (–2,8 °С). Средняя годовая температура воздуха имеет небольшой отрицательный тренд, что говорит о незначительном похолодании. Абсолютный максимум температуры за последние 30 лет составил 34,5 °С в июле, абсолютный минимум –43,1 °С в январе.

В среднем за период с 1988 по 2018 г. годовая сумма атмосферных осадков состави-

ла 584 мм. Максимальное среднее количество атмосферных осадков (79,9 мм) наблюдается в августе, минимальное (29,9 мм) – в январе. Суммарная продолжительность солнечного сияния – 1837 ч в год, наибольший вклад в которую вносит продолжительность солнечного сияния в июле (314 ч), а наименьший – в декабре (1,7 ч).

Пункты исследований

В период с 7 по 14 июля 2019 г. были организованы экспедиционные работы, в задачи которых входили: выбор пунктов исследования, установка автоматической метеостанции, проведение измерений потоков углекислого газа, метана, температуры воздуха и торфяной залежи до глубины 50 см, уровня болотных вод, их кислотности и электропроводности.

Потоки парниковых газов измерялись в девяти пунктах исследований, расположенных в типичных болотных экосистемах эвтрофного, мезотрофного и олиготрофного типов с учетом разнообразия микроландшафтов, а также на антропогенно-преобразованном участке олиготрофного болота (табл. 1). Характеристики растительного покрова пунктов приведены в табл. 2.

На территории грядово-мочажинного комплекса с сосново-кустарничково-пушицево-сфагновыми и кустарничково-пушицево-сфагновыми грядами в сочетании с осоково-пушицево-сфагновыми мочажинами были организованы три пункта наблюдений, расположенных на олиготрофной мочажине (П-1), необлесенной олиготрофной гряде (П-2) и олиготрофной гряде с невысокой сосной (П-3).

Пункты исследований П-4, П-5 и П-6 были выбраны на сосново-кустарничково-сфагновом болоте. Данный тип болотных экосистем отличается хорошо выраженным ярусом низкорослой сосны болотной формы и занимает нередко целые болотные массивы, известен в Западной Сибири под названием ряб. Вблизи пункта исследований П-6 на сосново-кустарничково-сфагновом болоте (низком ряме), на просеке под линией электропередач (ЛЭП) были оборудованы пункты П-4 и П-5. Во время прокладки ЛЭП древесная растительность (мелкая сосна) ряма была срублена, измельчена и оставлена здесь же в соответствии с утвержденным Проектом освоения

Пункты и даты исследований, число измерений удельных потоков

Пункт	с. ш., в. д.	Экосистема	Дата	Число измерений	
				CH ₄	CO ₂
П-1	60.016, 71.212	Олиготрофная мочажина на ГМК	08.07.2019	9	99
П-2	60.016, 71.212	Олиготрофная гряда, необлесенная на ГМК	09.07.2019	9	19
П-3	60.016, 71.211	Олиготрофная гряда, облесенная на ГМК	09.07.2019	9	–
П-4а	60.028, 71.237	Просека по низкому рямю под ЛЭП – растительные остатки	10.07.2019	–	11
П-4б	60.028, 71.237	Просека по низкому рямю под ЛЭП-торф	10.07.2019	9	11
П-5	60.029, 71.237	Сосново-кустарничково-сфагновое болото (низкий рям)	10.07.2019	9	165
П-6	60.020, 71.189	Березово-сосновое мезотрофное сообщество	11.07.2019	9	–
П-7	60.022, 71.191	Березовое эвтрофное болото	12.07.2019	9	32
П-8	60.028, 71.036	Открытая вахтово-сфагновая мезотрофная топь	13.07.2019	9	127
			Всего	72	464

П р и м е ч а н и е. В двух последних столбцах представлено общее количество измерений удельных потоков метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂).

лесов. Кроме того, верхний слой болота уплотнен тяжелой техникой. Естественный покров нарушен, однако вместо сфагновых мхов и кустарничков на поверхности активно расселяется пушица. Наземная растительность в местах измерений в пунктах П-4 и П-5 отсутствует. Пункт П-4 был оборудован на площадке с древесными остатками после переработки болотных сосен, вырубленных на месте прокладки ЛЭП. Слой древесных стружек и обломков стволов деревьев перекрывает мох и траву, а кустарнички, обильно растущие в ряме, вероятно, были притоптаны или выкорчеваны при вырубке деревьев.

Местами, где воздействие техники было более значительно, на просеке образовались участки открытого торфа с лужицами болотных вод. Поверхность в таких участках рыхлая и без растительности. Пункт П-5 расположен на краю торфяной лужи, оставшейся после прохождения техники, прокладывавшей просеку. После перемешивания верхних слоев торфа и мха масса открытого торфа оказалась на поверхности, в углублении.

Березово-вахтово-осоково-гишновое эвтрофное болото (пункт исследований П-8) имеет характерный мелковолнистый ячеисто-кочковатый микрорельеф поверхности, формирующийся дернинами гипновых мхов. Относительный перепад высот составляет 5–10 см с более глубокими ямками, в которых стоит вода. Уровень грунтовых вод – 15–20 см

ниже среднего уровня поверхности мохового ковра. Пункт исследований П-9 располагался на вахтово-сфагновой мезотрофной открытой топи с плоской поверхностью без выраженных перепадов и уровнем вод вблизи поверхности.

Измерения потоков углекислого газа

Автоматические измерения потоков CO₂ проводились во всех пунктах, кроме П-3 и П-7, с помощью системы почвенного дыхания Licor LI-8100A в составе: блок газоанализатора LI-8100, автоматическая прозрачная камера LI-8100-104C, блок питания LI-8150-770, почвенные основания, блок внешних датчиков. Почвенное основание аккуратно врезалось в моховую дернину, на нее помещалась камера, которая присоединялась к газоанализатору, размещенному на деревянных мостках (2 × 0,5 м). Питание автоматической системы осуществлялось от автомобильного аккумулятора, а на расстоянии 50–70 м размещался бензогенератор, работающий круглосуточно для подзарядки аккумулятора. Система работала автономно без участия оператора в течение 4–24 ч. После продолжительной серии измерений в одном наблюдательном пункте оборудование демонтировалось и переносилось в следующий пункт. Прозрачная камера (объемом 4076,1 см³ с площадью основания 317,8 см²) закрывалась каждые 20 мин

Характеристики растительного покрова пунктов исследования

Пункт	Встречающиеся виды
П-1-3 – грядо-во-мочажинный комплекс	<p>На грядах:</p> <p>древесный ярус (1–2 %): <i>Pinus sylvestris</i> f. <i>litwinowii</i></p> <p>кустарничковый ярус (30–60 %): <i>Ledum palustre</i>, <i>Camaedaphne calyculata</i>, <i>Andromeda polifolia</i></p> <p>травяной ярус (5–30 %): <i>Eriophorum vaginatum</i>, <i>Oxycoccus palustris</i>, <i>O. macrocarpa</i>, <i>Rubus chamaemorus</i>, <i>Drosera rotundifolia</i></p> <p>моховой покров (100 %): <i>Sphagnum fuscum</i> с примесью <i>S. angustifolium</i>, <i>S. magellanicum</i>, <i>Polytrichum strictum</i></p> <p>В мочажинах:</p> <p>травяной ярус (5–20 %): <i>Carex limosa</i>, <i>Scheuchzeria palustris</i></p> <p>моховой покров (100 %): <i>Sphagnum balticum</i></p>
П-4 – древесные остатки	<p>Древесные остатки (100 %)</p> <p>Растительный покров отсутствует</p>
П-5 – просека ЛЭП по рямю	<p>Открытый торф (100 %)</p> <p>Растительный покров отсутствует</p>
П-6 – сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям)	<p>Древесный ярус (30–40 %): <i>Pinus sylvestris</i> f. <i>litwinowii</i></p> <p>Кустарничковый ярус (50–70 %): <i>Ledum palustre</i>, <i>Camaedaphne calyculata</i>, <i>Andromeda polifolia</i> с включениями <i>Betula nana</i></p> <p>Травяной ярус (20–30 %): <i>Rubus chamaemorus</i>, <i>Oxycoccus palustris</i>, <i>O. microcarpa</i> с примесью <i>Eriophorum vaginatum</i>, <i>Drosera rotundifolia</i></p> <p>Моховой покров (100 %): <i>Sphagnum fuscum</i>, <i>S. angustifolium</i>, <i>S. magellanicum</i> с примесью <i>Mylia anomala</i>, <i>Pleurozium schreberi</i>, <i>Polytrichum strictum</i></p>
П-7 – березово-сосновое эвтрофное болото	<p>Древесный ярус (60–80 %): <i>Pinus sylvestris</i>, <i>Betula pendula</i></p> <p>Кустарничковый ярус (20 %): <i>Ledum palustre</i> с включениями <i>Camaedaphne calyculata</i>, <i>Betula nana</i>, <i>Vaccinium uliginosum</i></p> <p>Травяной ярус (20–30 %): <i>Menyanthes trifoliata</i>, <i>Equisetum fluviatile</i>, <i>Bistorta officinalis</i> с включениями <i>Drosera rotundifolia</i>, <i>C. rostrata</i>, <i>C. diandra</i>, <i>C. chordorrhiza</i>, <i>Carex dioica</i>, <i>C. aprocynosa</i>, <i>C. magellanica</i>, <i>Calamagrostis neglecta</i>, <i>Comarum palustre</i>, <i>Moneses uniflora</i>, <i>Pyrola rotundifolia</i>, <i>Rumex acetosa</i>, <i>Angelica tenuifolia</i></p> <p>Моховой покров (90–100 %): <i>Sphagnum warnstorffii</i> с включениями <i>Plagiomnium ellipticum</i>, <i>Rhizomnium pseudopunctatum</i>, <i>Campylium stellatum</i>, <i>Bryum pseudotriquetrum</i>, <i>Helodium blandowii</i>, <i>Tomentypnum nitens</i>, <i>Schljakowia kunzeana</i>, <i>Scapania irrigua</i>, <i>Calypogeia muelleriana</i>, <i>C. integriripula</i>, <i>Lepidozia reptans</i>, <i>Lophocolea heterophylla</i></p>
П-8 – березово-вахтово-осоково-гипновое эвтрофное болото	<p>Древесный ярус (5 %): <i>Betula pendula</i>, <i>Salix cinerea</i>, <i>S. lapponum</i></p> <p>Кустарничковый ярус (5 %): <i>Betula nana</i></p> <p>Травяной ярус (70–90 %): <i>Carex limosa</i>, <i>Menyanthes trifoliata</i>, <i>Comarum palustre</i> с включениями <i>C. diandra</i>, <i>C. chordorrhiza</i>, <i>Galium palustre</i>, <i>G. uliginosum</i>, <i>Epilobium palustre</i>, <i>Cicuta virosa</i>, <i>Eriophorum gracile</i>, <i>Thelypteris palustris</i>, <i>Galium palustre</i>, <i>G. uliginosum</i>, <i>Epilobium palustre</i>, <i>Cicuta virosa</i>, <i>Eriophorum gracile</i>, <i>Thelypteris palustris</i></p> <p>Моховой покров (90 %): <i>Homatocaulis vernicosus</i>, <i>Drepanocladus aduncus</i>, <i>Helodium bandowii</i>, <i>Warnstorffia exannulata</i>, <i>Calliergon cordifolium</i>, <i>Bryum pseudotriquetrum</i>, <i>Brachythecium mildeanum</i> с включениями <i>Sphagnum warnstorffii</i>, <i>S. squarrosum</i>, <i>S. obtusum</i></p>
П-9 – вахтово-сфагновая мезотрофная открытая топь	<p>Древесный ярус: нет</p> <p>Кустарничковый ярус: нет</p> <p>Травяной ярус (20–80 %): <i>Menyanthes trifoliata</i>, <i>Calamagrostis neglecta</i>, <i>Comarum palustre</i> с включениями <i>Carex limosa</i>, <i>Drosera rotundifolia</i>, <i>C. rostrata</i>, <i>C. diandra</i>, <i>C. chordorrhiza</i>, <i>Oxycoccus palustris</i></p> <p>Моховой покров (100 %): <i>S. obtusum</i>, <i>S. fallax</i> с включениями <i>S. riparium</i>, <i>S. jensenii</i>, <i>Warnstorffia fluitans</i>, <i>Straminergon stramineum</i></p>

на 4 мин, в течение которых ежесекундно записывались данные о содержании CO₂ и H₂O в камере. Результаты измерений обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения LI-8100 File Viewer 3.1.0. При каждом измерении для расчета потока CO₂ брался такой интервал времени, в течение которого его концентрация изменялась линейно.

Измерения потоков метана

Потоки метана измерялись во всех пунктах (за исключением П-5) с помощью метода статических ручных камер. На выбранном участке болота устанавливались временные деревянные мостки (2 × 0,5 м), снижающие давление исследователя на торф. Далее с помощью пилы на глубину 15–20 см ниже уровня мохового покрова врезались прямоугольные (40 × 40 см) стальные основания с углублениями по периметру. В эти углубления заливалась дегазированная водопроводная вода. Измерения удельного потока начинались не ранее чем через 1 ч после окончания установки оснований.

В некоторых экосистемах было выделено несколько микроландшафтов, в которых проводились измерения. Так, на олиготрофном грядово-мочажинном комплексе были выделены осоково-шейхцеригово-сфагновые мочажины (П-1) с уровнем болотных вод 3 см,

кустарничково-пушицево-сфагновые повышения (П-2) с уровнем болотных вод 15 см и сосново-кустарничково-сфагновые гряды (П-3) с уровнем болотных вод 20–30 см. В низком ряме (П-6) и на просеке под ЛЭП (П-5) по низкому рямю отдельные микроландшафты не выделялись. На березово-сосновом мезотрофном (П-7), открытом эвтрофном (П-8) и открытом мезотрофном (П-9) болотах выделены повышенные (кочки) и пониженные (мочажины) элементы микрорельефа. Таким образом, всего измерения эмиссии метана проведены в 11 болотных микроландшафтах (табл. 3).

В каждом пункте наблюдений измерения удельного потока велись одновременно тремя камерами, расположенными на расстоянии 2–3 м друг от друга. Каждой камерой проводилось по три последовательных измерения (повторности). Таким образом, на каждом пункте удельный поток метана измерялся девять раз. Длительность одного измерения удельного потока метана составляла 30 минут, в течение которых из каждой камеры в 20 мл шприцами (KD-JEST III, KDM, Германия) отбирались последовательно четыре пробы газа (в начале измерения, затем через каждые 10 мин). Сразу же после пробоотбора каждый шприц герметизировался резиновой пробкой, надевавшейся на кончик шприца. Пробы хранились в темноте до момента анализа. Концентрация метана в пробах рассчитывалась с помощью газового хроматографа Кри-

Т а б л и ц а 3
Эмиссия метана из исследованных болот и влияющие на нее экологические факторы

№	Пункт наблюдений, микроландшафт	Среднее ± std	Медиана	УБВ, см	ЕС, мкСм см ⁻¹	рН	T ₁₅ , °С
		мгСН ₄ ·м ⁻² ·ч ⁻¹					
1	П-1	3,9 ± 0,7	3,8	3	42	4,0	15,5
2	П-2	1,1 ± 0,9	1,1	15	49	3,9	16,2
3	П-3	0,3 ± 0,3	0,2	26	64	4,0	16,4
4	П-5	4,6 ± 1,4	4,3	7	287	3,8	15,0
5	П-6	2,4 ± 0,6	2,3	15	120	3,7	10,0
6	П-7, кочки	2,5 ± 0,6	2,3	13	101	6,4	13,4
7	П-7, мочажины	6,9 ± 0,7	7,0	0	101	6,4	13,4
8	П-8, мочажины	7,0 ± 1,6	6,2	-10	179	6,5	13,5
9	П-8, кочки	3,0 ± 1,2	2,8	13	179	6,5	13,5
10	П-9, мочажина	23,9 ± 4,2	23,1	6	25	4,6	19,0
11	П-9, кочки	10,6 ± 2,4	11,0	12	25	4,6	19,0

П р и м е ч а н и е. Среднее и медиана – величины удельного потока метана из соответствующих экосистем; УБВ – средний уровень болотных вод; ЕС – удельная электропроводность болотных вод на глубине 30 см от поверхности мха; рН – кислотность болотных вод на глубине 30 см от поверхности мха; T₁₅ – температура торфа на глубине 15 см от поверхности мха.

сталл-5000.1 через неделю после начала полевых работ. Хроматограф Кристалл-5000.1 со стальными колонками (длиной 1 м), наполненными сорбентом HayeSep Q (80–100 mesh) при 80 °С с азотом в качестве газа-носителя (скорость потока 35 мл/мин), оснащен двумя пламенно-ионизационными детекторами, позволяющими осуществлять измерения концентрации метана с точностью 0,02 ppm. Удельный поток метана вычислялся на основании измеренных значений концентрации метана с помощью линейной регрессии в координатах время – концентрация по четырем параметрам значений. Подробности этой процедуры описаны в [Sabrekov et al., 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Потоки углекислого газа

Внутрисуточная вариабельность удельного потока CO_2 очень велика [Головацкая, Дю-

карев, 2011], поскольку чистый экосистемный обмен формируется в результате взаимовлияния потоков эмиссии углекислого газа почвой и растениями, а также ассимиляции CO_2 фотосинтезирующими частями растений на свету. Экосистемное дыхание и фотоассимиляция управляются множеством параметров, основными из которых являются приходящая фотосинтетически активная солнечная радиация, температура и влажность воздуха, а также уровень болотных вод.

На рис. 2 представлен временной ход температуры воздуха в измерительной камере и чистого экосистемного обмена (или удельного потока CO_2) в некоторых исследованных экосистемах. Как правило, в светлое время суток преобладает поглощение CO_2 растительностью над экосистемным дыханием и потоки принимают отрицательные значения. Ночью, напротив, поток CO_2 положительный, т. е. происходит эмиссия углекислого газа из экосистемы в атмосферу. В табл. 4 приведены

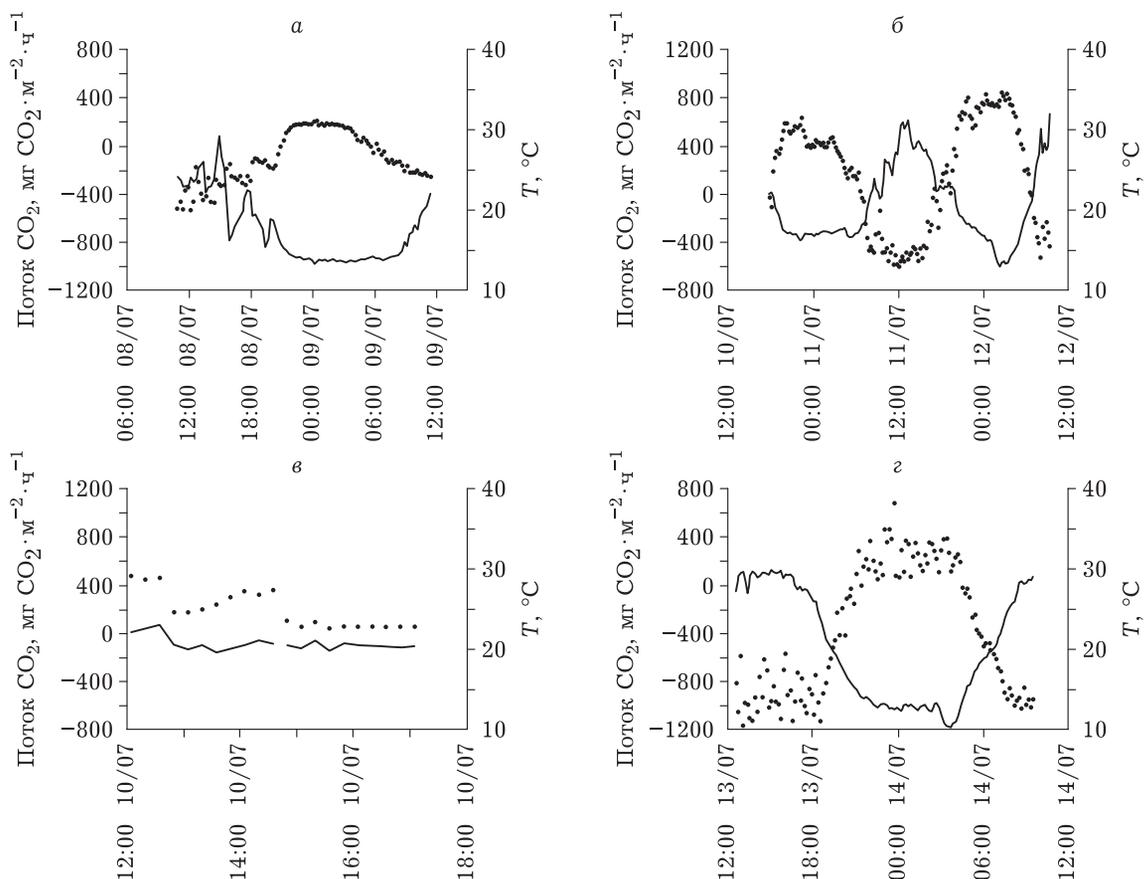


Рис. 2. Временной ход потоков CO_2 (точки) и температуры воздуха в камере (линии).

а – мочажина (II-1) грядково-мочажинного комплекса; б – сосново-кустарничково-сфагновое болото (II-6); в – просека под ЛЭП (II-4 – древесные остатки); г – открытая транзитная мезотрофная топь (II-9)

Статистические характеристики результатов измерений удельных потоков углекислого газа: число измерений, использованных для осреднения (n), среднее значение \pm среднеквадратическое отклонение температуры воздуха (T_v) и относительной влажности воздуха (RH), удельного потока CO_2 , его максимальное/минимальное значение

Пункт	Дата начала/ окончания	n	T_v , °C	RH, %	Поток CO_2 , $\text{мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$	Мин/Макс поток CO_2 , $\text{мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$
П-1	08.07 11:00	99	17,5	90,5	-100,7	-529,8
	09.07 11:20		$\pm 4,2$	$\pm 6,2$	$\pm 212,4$	206,3
П-2*	09.07 12:00	19	21,1	72,9	-461,0	-750,2
	09.07 16:20		$\pm 3,6$	$\pm 21,9$	$\pm 151,4$	-215,7
П-4*	10.07 12:00	11	21,1	85,6	324,9	182,8
	10.07 14:30		$\pm 1,1$	$\pm 2,0$	$\pm 111,5$	480,3
П-5*	10.07 14:40	11	20,7	84,7	72,6	46,8
	10.07 17:40		$\pm 0,4$	$\pm 1,5$	$\pm 22,4$	110,5
П-6	10.07 18:00	165	20,8	86,1	143,2	-599,3
	12.07 9:20		$\pm 4,8$	$\pm 5,0$	$\pm 461,5$	841,5
П-8*	12.07 11:00	32	34,7	72,6	-511,4	-708,5
	12.07 16:30		$\pm 2,9$	$\pm 7,8$	$\pm 170,5$	-223,7
П-9	13.07 12:30	127	25,3	67,1	-376,4	-1161,6
	14.07 9:30		$\pm 6,9$	$\pm 18,0$	$\pm 534,3$	687,3

* Измерения проводились только в дневное время.

статистические характеристики результатов измерений потоков углекислого газа.

Удельные потоки CO_2 , зарегистрированные на мочажине грядово-мочажинного комплекса (П-1), в течение полных суток варьировали в диапазоне от $-529,8$ до $+206,3 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, причем максимальное поглощение наблюдалось в полдень, а наибольшее выделение CO_2 – около полуночи. Средний за сутки удельный поток CO_2 , зарегистрированный в П-1, составляет $-100,7 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ и вполне адекватно отражает характерную величину чистого экосистемного обмена, регистрируемого в мочажинах ГМК болота Мухрино ($-98,4 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) [Dyukarev et al., 2019].

Измерения на гряде ГМК проводились только в дневное время, где значения чистого экосистемного обмена достигали $-750,2 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в 12:40 (местного времени), что на 41,6 % больше, чем на мочажине. Интенсивность чистого экосистемного обмена на грядах ГМК болота Мухрино также выше, чем на мочажинах, однако суммарное годовое поглощение углерода на мочажинах больше вследствие меньших значений экосистемного дыхания [Dyukarev et al., 2019].

В пунктах наблюдений под просекой ЛЭП (П-4 и П-5) отрицательные потоки CO_2 не были зарегистрированы, поскольку измерения проводились на двух площадках, лишенных растительности. В пункте П-4 моховой

покров перекрыт слоем древесных остатков и наблюдалось только выделение CO_2 со скоростью от 182,8 до $480,3 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Эмиссия углекислого газа с участка открытого торфа (П-5) несколько меньше, чем на площадке с древесными остатками, и составляет $46,8$ – $110,5 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в дневное время.

Самая длительная серия измерений проведена на микроповышении на сосново-кустарничково-сфагновом болоте (П-6), где в течение 33 ч наблюдалось как значительное выделение ($841,5 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) в 2 ч ночи, так и поглощение ($-599,3 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) углекислого газа в полдень. Средний за календарные сутки (11 июля 2019 г.) чистый экосистемный обмен принимает положительное значение $25,5 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что свидетельствует о выделении углерода в середине лета. Однако такая оценка является не полной, поскольку не включает учет поглощения CO_2 древесным ярусом, но содержит в себе поток от дыхания корней деревьев.

Измерение чистого экосистемного обмена на березово-вахтово-осоково-гипновом эвтрофном болоте (П-8) показало, что скорость поглощения CO_2 меняется в диапазоне $223,7$ – $708,5 \text{ мгCO}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Измерения проводились в дневное время в очень жаркую погоду, вероятно, в условиях угнетения фотосинтеза. При этом удельный поток CO_2 в условиях искусственного затенения положителен и состав-

ляет $1610,4 \pm 241,3 \text{ мгСО}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Сопоставление данных измерений при естественном освещении и в темноте позволяет оценить интенсивность валовой первичной продукции. Растительность на березово-вахтово-осоково-гипновом эвтрофном болоте в процессе фотосинтеза 12 июля 2019 г. в 15 : 00 (местного времени) поглощала $2121,8 \text{ мгСО}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Максимальные вариации потоков СО_2 зарегистрированы на вахтово-сфагновой мезотрофной открытой топи (П-9), где максимальное поглощение в 13 : 00 было $1161,6 \text{ мгСО}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, а выделение СО_2 со скоростью до $687,3 \text{ мгСО}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ получено в полночь. Чистый экосистемный обмен в течение суток наблюдений 13 июля 2019 г. составил $-376,4 \text{ мгСО}_2 \text{ м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Корректная интерпретация результатов краткосрочных измерений возможна только при использовании балансовых математических моделей, описывающих основные стоки и источники углекислого газа в экосистеме, учитывающих изменения управляющих параметров [Dyukarev, 2017].

Потоки метана

Эмиссия метана значительно различалась для болотных экосистем с различной степенью обводнения во всех исследованных пунктах. Эмиссия из более обводненных участков – мочажин, была значительно выше (в два и более раза), чем из локальных повышений – гряд и кочек. Это традиционно объясняется тем, что в более обводненных участках большая часть торфа оказывается под водой, т. е. в анаэробных (бескислородных) условиях, в которых метан образуется как один из продуктов микробного разложения органического вещества [Conrad, 2007; Lai, 2009]. Одновременно меньшая часть профиля болота оказывается в аэробных условиях, что снижает долю окисленного метана бактериями-метанотрофами, являющимися облигатными аэробами [Conrad, 2007]. Оба этих обстоятельства – рост продукции и уменьшение окисления – способствуют увеличению эмиссии метана с поверхности болота [Kettunen et al., 1999; Conrad, 2007; Lai, 2009].

Эмиссия метана из мезотрофных и эвтрофных болот была значительно выше, чем из исследованных олиготрофных болотных экосистем ($p = 0,0091$, $N = 12$ и $p = 0,0081$, $N = 12$ соот-

ветственно). При этом эмиссии метана из мезотрофной и эвтрофной болотных экосистем значимо между собой не отличаются ($p = 1$, $N = 6$). Такая же картина наблюдается и при сравнении эмиссии из повышенных элементов микрорельефа ($p = 0,0028$, $N = 15$ и $p = 0,0120$, $N = 15$ при сравнении повышения на олиготрофном болоте (П-2 в табл. 4) с кочками на мезотрофном (П-7, кочки) и эвтрофном (П-8, кочки) болоте соответственно). Таким образом, с увеличением богатства минерального питания растений (отражающегося в росте удельной электропроводности, показывающей общее количество ионов, растворенных в болотной воде, от 30–60 $\text{мкСм} \cdot \text{см}^{-1}$ в олиготрофных болотах до 100–180 в мезотрофных и эвтрофных) эмиссия метана возрастает. Эта закономерность типична для болот субарктического (по Кеппену) климатического пояса и традиционно объясняется тем, что в условиях более богатого минерального питания растения выделяют больше корневых экссудатов, что существенно увеличивает продукцию метана [Lai, 2009; Bao et al., 2021].

Максимальные значения эмиссии метана среди исследованных болот были обнаружены в открытом мезотрофном болоте (рис. 3, П-9 в табл. 1). Для пониженных элементов рельефа удельный поток из открытого мезотрофного болота в 6 раз выше, чем из олиготрофного, и в 3 раза выше, чем из облесенного мезотрофного и открытого эвтрофного болота. Для повышенных элементов рельефа наблюдается аналогичная картина. При этом для исследованного открытого мезотрофного болота характерна существенно (на 3–6 °С) более высокая температура торфа на глубине 15 см по сравнению с другими исследованными болотами (см. табл. 3). Такая разница в температуре торфа вполне способна объяснить наблюдающиеся различия в величинах удельных потоков. Эмиссия метана в болотных экосистемах возрастает в 2–10 раз при повышении температуры торфа на десять градусов [Bartlett et al., 1985; Gauci et al., 2004; Yvon-Durocher et al., 2014]. Величина, на которую вырастет эмиссия, зависит от среднего уровня болотных вод (согласно [Turetsky et al., 2014; Bao et al., 2021], температурная чувствительность возрастает при повышении уровня болотных вод от 40 см ниже поверхности мха до 0 см, после чего резко падает) и типа

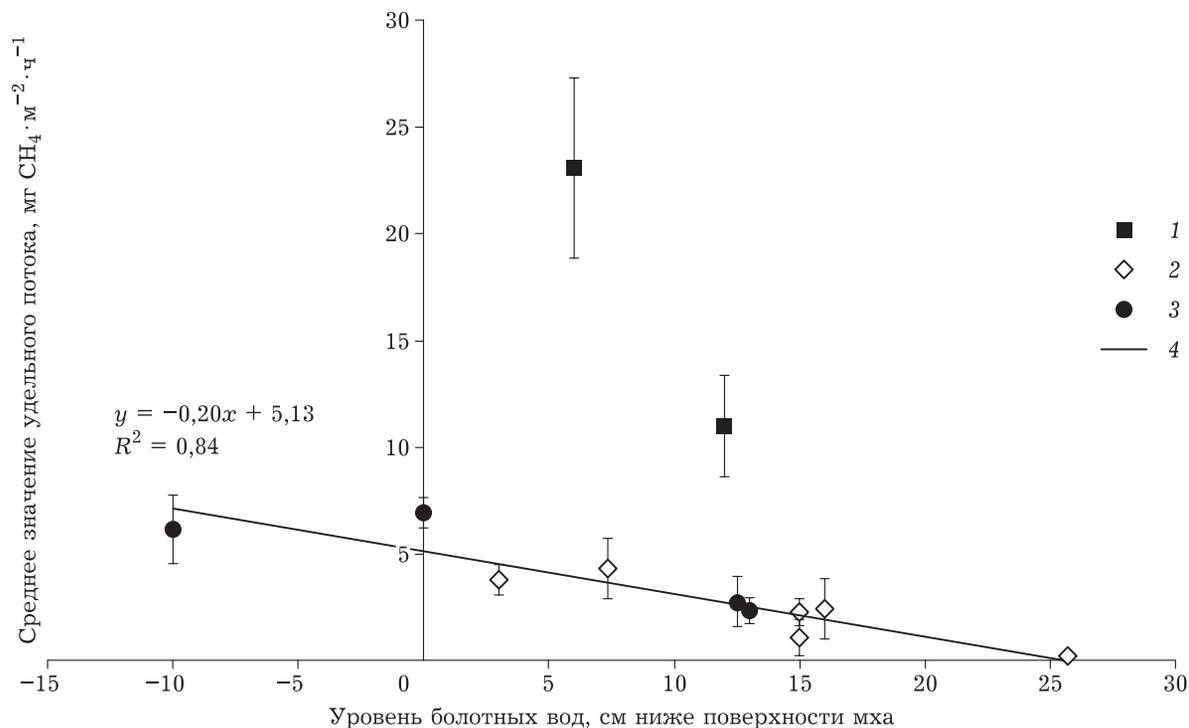


Рис. 3. Зависимость эмиссии метана от уровня болотных вод. 1 – открытое мезотрофное болото; 2 – олиготрофные болотные экосистемы; 3 – прочие мезотрофные и эвтрофные болотные экосистемы; 4 – линейный тренд для всех болотных экосистем, за исключением открытого мезотрофного болота

болотной экосистемы (согласно [Bao et al., 2021], температурная чувствительность выше для мезотрофных и эвтрофных болот, чем для олиготрофных). Таким образом, именно для исследованного открытого мезотрофного болота температурная чувствительность эмиссии метана должна быть максимальной, что объясняет наблюдавшиеся высокие значения эмиссии. По другим характеристикам открытое мезотрофное болото отличается от прочих болот, исследованных нами в рамках настоящей работы: оно имеет промежуточное, характерное для мезотрофных болот, значение рН (4,6) и очень низкое значение удельной электропроводности, даже ниже, чем в исследованном олиготрофном болоте (25 мкСм·см⁻¹).

Просека по низкому ряму под ЛЭП (П-5) отличалась от собственно низкого ряма (П-6), по которому она проходит, повышенным уровнем болотных вод, т. е. большей обводненностью (вероятно, ввиду уплотнения торфяной толщи из-за проезда тяжелой техники и/или минерализации нарушенного поверхностного слоя торфа), в 2 раза большим значением удельной электропроводности воды (287 мкСм·см⁻¹), но имела сходное значение

рН болотных вод. Эмиссия метана из пункта наблюдений на просеке (П-5) оказалась значимо ($p = 0,0005$, $N = 18$) выше, чем из мочажины в низком ряме, и статистически не отличалась от эмиссии из мочажины в олиготрофном грядово-мочажинном комплексе ($p = 0,34$, $N = 18$) при близком уровне болотных вод (3 и 7 см ниже поверхности мха для олиготрофной мочажины и просеки по низкому ряму соответственно). Таким образом, можно сделать вывод о том, что прокладка просек увеличивает эмиссию метана, превращая просеки в такие же его источники, какими являются олиготрофные мочажины в грядово-мочажинных комплексах.

Эмиссия метана для всех исследованных болотных экосистем линейно ($p = 0,0005$, $N = 9$) зависела от уровня болотных вод (см. рис. 3): чем он выше, тем больше эмиссия метана. Полученная зависимость является линейной в широком интервале значений уровня болотных вод – от 10 см выше уровня поверхности мха до 25 см ниже уровня поверхности мха. На первый взгляд, это противоречит общепринятой закономерности, согласно которой зависимость эмиссии метана от уров-

ня болотных болот имеет колоколообразную форму [Lai, 2009; Turetsky et al., 2014; Bao et al., 2021]. Разрешить это противоречие можно с учетом того, что максимальная эмиссия для олиготрофных болот, с одной стороны, и мезотрофных и эвтрофных, с другой, приходится на разные величины уровня болотных вод: около 15 см ниже поверхности мха для олиготрофных болот и около 0 см для мезотрофных и олиготрофных [Turetsky et al., 2014; Bao et al., 2021]. Таким образом, полученная линейная зависимость эмиссии метана от уровня болотных вод для всего разнообразия болотных экосистем является следствием того, что мезотрофные и эвтрофные болота характеризуются более высоким уровнем болотных вод и эмиссией метана, чем олиготрофные.

Единственным болотом, для которого линейная зависимость эмиссии метана от уровня болотных вод нарушается, было открытое мезотрофное болото (см. квадраты на рис. 3). Как уже отмечалось выше, это может быть связано с более высокой температурой в толще торфа этого болота и высокой температурной чувствительностью эмиссии. Таким образом, можно предположить, что именно для открытых мезотрофных сфагновых болот с уровнем болотных вод от 0 до 10 см ниже поверхности мха эмиссия метана будет сильнее всего увеличиваться с ростом температуры почвы болотных экосистем [Киселев и др., 2019], происходящим в связи с современным потеплением климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Болота занимают приблизительно половину территории лицензионных участков Салымской группы месторождений и играют важнейшую роль в долговременном депонировании парниковых газов, однако одновременно являются мощным источником метана. Поэтому необходимо сохранять углерод-депонирующую функцию болот, минимизировав антропогенное вмешательство в болотные экосистемы, предотвращая нарушение естественного поверхностного покрова и гидрологического режима.

Обобщение результатов экспедиционных исследований позволило получить оценки потоков углекислого газа и метана в болотных экосистемах исследуемой территории. Отме-

чено, что максимальные потоки углекислого газа наблюдаются на мезотрофных и эвтрофных болотах. В естественных болотных экосистемах преобладает нетто-аккумуляция углекислого газа из атмосферы. Эмиссия метана из повышенных элементов микрорельефа исследованных болотных экосистем оказалась значительно меньше, чем из пониженных. Эвтрофные и мезотрофные болота выделяли больше CH_4 , чем олиготрофные. Прокладка трасс по низкому рямю и прохождение по ним тяжелой техники значительно увеличивают эмиссию метана и снижают поглощение углекислого газа, превращая нарушенные участки в источник парниковых газов. Повышение температуры торфа на 3–6 °C может увеличивать эмиссию метана в несколько раз.

Исследовательская работа выполнена при поддержке компании “Салым Петролеум Девелопмент Н. В.” в рамках НИР “Оценка эмиссии и поглощения парниковых газов болотными и лесными экосистемами на территории лицензионных участков Салымской группы месторождений”, по договору, заключенному между компанией “Салым Петролеум Девелопмент Н. В.” и “Югорским государственным университетом”, и при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта “Наука”.

ЛИТЕРАТУРА

- Анисимов О. А., Борщ С. В., Георгиевский В. Ю., Инсаров Г. Э., Кобышева Н. В., Костяной А. Г., Кренке А. Н., Семенов С. М., Сиротенко О. Д., Фролов И. Е., Хлебникова Е. И., Шерстюков Б. Г., Ананичева М. Д., Анохин Ю. А., Асарин А. Е., Асмус В. В., Болгов М. В., Борисова О. К., Величко А. А., Григорьев А. В. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: ИГКЭ РАН, 2012. 512 с.
- Боч М. С., Мазинг В. В. Экосистемы болот СССР. М.: Наука, 1979. 188 с.
- Букварева Е. Н. Роль наземных экосистем в регуляции климата и место России в посткритическом процессе. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 97 с.
- Бульгина О. Н., Веселов В. М., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России // Св-во о гос. регистрации базы данных № 2014620549. URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters> (дата обращения: 12.12.2020).
- Вомперский С. Э., Сирин А. А., Цыганова О. П., Валева Н. А., Майков Д. А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 21–33.

- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2014. 61 с.
- Головацкая Е. А., Дюкарев Е. А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO₂ с поверхности олиготрофной торфяной почвы // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 6. С. 84–93.
- Доктуровский В. С. Торфяные болота. Курс лекций по болотоведению. М.; Л.: Гостехиздат, 1932. 192 с.
- Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Мелентьева Н. В. Запасы углерода в экосистемах болот // *Углерод в экосистемах лесов и болот России*. Красноярск: ВЦ СО РАН, 1994. С. 128–139.
- Иванов К. Е., Новиков С. М. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 447 с.
- Инвентаризация биоразнообразия и создание природоохранной карты на территорию Салымской группы месторождений: Отчет о научно-исследовательской работе в рамках договора № MOS/13/0035. Ханты-Мансийск: ЮГУ, 2015. 141 с.
- Карелин Д. В., Замолодчиков Д. Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука, 2008. 344 с.
- Киселев М. В., Дюкарев Е. А., Воропай Н. Н. Сезонно-мерзлый слой болот южно-таежной зоны Западной Сибири // *Криосфера Земли*. 2019. Т. XXIII, № 4. С. 3–15.
- Лисс О. Л., Березина Н. А. Болота Западно-Сибирской равнины. М.: Наука, 1981. 208 с.
- Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н. А., Березина Н. А., Инишева Л. И., Курнишкова Т. В., Служка З. А., Толпышева Т. Ю., Шведчикова Н. К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. В. Б. Куваева. Тула: Грифи К°, 2001. 584 с.
- Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / ред. Г. А. Заварзин. М.: Наука, 2007. 324 с.
- Шепелева Л. Ф., Обухова Ю. Н., Самойленко З. А., Волегова Е. А. Болотная растительность бассейна реки Большой Салым // *Сб. науч. тр. биол. фак-та Сург. гос. ун-та. Вып. 4. Сургут: Изд-во СурГУ, 2008. С. 45–58.*
- Baird A., Belyea L., Comas X., Reeve A., Slater L. Carbon Cycling in Northern Peatlands. *Geophysical Monograph Series*. AGU. 2013. P. 297.
- Bao T., Jia G., Xu X. Wetland Heterogeneity Determines Methane Emissions: A Pan-Arctic Synthesis // *Environ. Sci. & Technol.* 2021. Vol. 55, N 14. P. 10152–10163.
- Bartlett K. B., Harriss R. C., Sebacher D. I. Methane Flux from Coastal Salt Marshes // *J. Geophys. Res.* 1985. Vol. 90. P. 5710–5720.
- Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. Carbon and Other Biogeochemical Cycles // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs // *Advances in Agronomy*. 2007. Vol. 96. P. 1–63.
- Dyukarev E. A. Partitioning of net ecosystem exchange using chamber measurements data from bare soil and vegetated sites // *Agricul. and Forest Meteorol.* 2017. Vol. 239. P. 236–248. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.03.011
- Dyukarev E., Godovnikov E., Karpov D., Kurakov S., Lapshina E., Filippov I., Filippova N., Zarov E. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. Vol. 2, N 2. P. 227–244. doi: 10.24057/2071-9388-2018-77
- Gauci V., Fowler D., Chapman S. J., Dise N. B. Sulfate deposition and temperature controls on methane emission and sulfur forms in peat // *Biogeochemistry*. 2004. Vol. 71. P. 141–162.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds.: T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- Kettunen A., Kaitala V., Lehtinen A., Lohila A., Alm J., Silvola J., Martikainen P. J. Methane production and oxidation potentials in relation to water table fluctuations in two boreal mires // *Soil Biol. Biochem.* 1999. Vol. 31. P. 1741–1749.
- Lai D. Methane dynamics in northern peatlands: a review // *Pedosphere*. 2009. Vol. 19. P. 409–421.
- Parazoo N. C., Koven C. D., Lawrence D. M., Romanovsky V., Miller C. E. Detecting the permafrost carbon feedback: Talik formation and increased cold-respiration as precursors to sink-to-source carbon transitions // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 123. P. 123–144. doi: 10.5194/tc-12-123-2018
- Rydin H., Jeglum J. *The Biology of Peatlands*. Oxford: Oxford Univ. Press, 2015. 400 p.
- Sabrekov A. F., Glagolev M. V., Alekseychik P. K., Smolentsev B. A., Terentjeva I. E., Krivenok L. A., Maksyutov S. S. A process-based model of methane consumption by upland soils // *Environ. Res. Lett.* 2016. Vol. 11, N 7. 075001. doi: 10.1088/1748-9326/11/7/075001
- Saunio M., Bousquet P., Poulter B., Peregón A., Ciais P. et al. The global methane budget 2000–2012 // *Earth System Science Data*. 2016. Vol. 8. P. 697–751. doi: 10.5194/essd-8-697-2016.
- Seinfeld J. H., Pandis S. N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, 2006.
- Sheng Y., Smith L. C., MacDonald G. M., Kremenetski K. V., Frey K. E., Velichko A. A., Lee M., Beilman D. W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. Vol. 18. GB3004. <https://doi.org/10.1029/2003GB002190>
- Turetsky M. R., Kotowska A., Bubier J. et al. A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands // *Global Change Biol.* 2014. Vol. 20, N 7. P. 2183–2197.
- Yvon-Durocher G., Allen A. P., Bastviken D., Conrad R., Gudasz C., St-Pierre A., Thanh-Duc N., del Giorgio P. A. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales // *Nature*. 2014. Vol. 507. P. 488–491. doi:10.1038/nature13164
- Yu Z. Holocene carbon flux histories of the world's peatlands: Global carbon-cycle implications // *The Holocene*. 2011. Vol. 21 (5). P. 761–774. doi: 10.1177/0959683610386982

Estimation of emission and accumulation of greenhouse gases by peatland ecosystems of the licensed areas of Salym oilfield at Nefteyugansk region of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug

E. A. DYUKAREV^{1,2}, A. F. SABREKOV^{1,3}, M. V. GLAGOLEV^{1,3,4}, M. V. KISELEV², I. V. FILIPPOV¹,
A. A. DMITRICHENKO¹, E. D. LAPSHINA¹

¹*Yugra State University
628012, Khanty-Mansiysk, Chekhov str., 16
E-mail: dekot@mail.ru*

²*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
634055, Tomsk, Academicheskii ave., 10/3*

³*A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS
119071, Moscow, Vavilov str., 34*

⁴*Faculty of Soil Science, M. V. Lomonosov Moscow State University
119991, Moscow, Leninskie gory, 1*

The paper summarizes the results of field studies of carbon dioxide and methane fluxes in peatland ecosystems on the territory of license areas of the Salym group of oil fields (Khanty-Mansi Autonomous Okrug).

The largest fluxes of carbon dioxide and methane are observed in mesotrophic and eutrophic bogs, which are characterized by the maximum of biomass storages. Significant negative CO₂ fluxes (–1161.6 mg CO₂ m^{–2}·h^{–1}) associated with photosynthesis have been recorded here, but they also have a high emission component of carbon exchange (ecosystem respiration) (more than 680 mg CO₂ m^{–2}·h^{–1}). Methane emission reaches 23.9 mg CH₄ m^{–2}·h^{–1}. In oligotrophic bogs, in the daytime, fluxes of CO₂ in range from –400 to –600 mg CO₂ m^{–2}·h^{–1} were recorded, and at night from +160 to +840 mg CO₂ m^{–2}·h^{–1}. Methane fluxes from hummocks in oligotrophic bog complexes were up to 1.1 mg CH₄ m^{–2}·h^{–1}, and from decreases 3.9 mg CH₄ m^{–2}·h^{–1} from hollows. Large carbon dioxide and methane fluxes were registered from the surface of clear-cuts at a pine-dwarf-shrub-sphagnum bog, where, depending on the ground cover, the release of CO₂ can be from +46 to +480 mg CO₂ m^{–2}·h^{–1}, and emission of CH₄ – up to 4.6 mg CH₄ m^{–2}·h^{–1}.

Key words: peatland ecosystems, carbon balance, greenhouse gases, methane, carbon dioxide.