

УДК 631.4

ПОТОКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА В ОЛИГОТРОФНЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. Е. А. Головацкая^{a, *} (<https://orcid.org/0000-0003-4354-7156>),
Е. Э. Веретенникова^{a, b}, Е. А. Дюкарев^{a, c}

^aИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Академический пр-т, 10/3, Томск, 634055 Россия

^bСибирский государственный медицинский университет, Московский тракт, 2, Томск, 634050 Россия

^cЮгорский государственный университет, ул. Чехова, 16, Ханты-Мансийск, 628012 Россия

*e-mail: golovatskayaea@gmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 26.09.2023 г.

Изучены запасы углерода (С) и темпы эмиссии парниковых газов (СО₂ и СН₄) в торфяных почвах южной тайги Западной Сибири. Исследуемые торфяные почвы относятся к олиготрофным типичным (Histosols), но развиваются в двух контрастных болотных экосистемах (залесенное и открытое болота), поэтому существенно различаются по современному растительному покрову, структуре почвенного профиля, гидрологическим и температурным условиям. Показано, что запасы углерода в исследуемых торфяных почвах в слое 0–50 см составляют 9.3 и 6.8 кг/м² на залесенном и открытом болотах соответственно. Измерения эмиссии СО₂ и СН₄ проводили камерным методом в течение вегетационных периодов с 1999 по 2014 гг. Результаты исследования показали, что почвы характеризуются близкими значениями потоков СО₂, 116.1 и 123.4 мг СО₂/(м² ч), для почв залесенного и открытого болот соответственно, в то же время значительно различаются по величине потоков СН₄, 0.57 и 2.66 мг СН₄/(м² ч) соответственно. Результаты исследований указывают на важную роль видового состава растительности и гидрологического режима торфяных почв, сформированных в разных болотных экосистемах региона в процессах депонирования углерода и потоков парниковых газов.

Ключевые слова: болотные экосистемы, типичные олиготрофные почвы (Histosols), биологическое разнообразие, эмиссия парниковых газов, запасы углерода

DOI: 10.31857/S0032180X24020023, EDN: XYXPSC

ВВЕДЕНИЕ

Научный интерес к исследованиям болотных экосистем определяется не только их планетарно значимой климаторегулирующей и средообразующей функцией, но и практическими задачами, которые связаны с оценкой экологических и социально-экономических последствий при промышленном освоении заболоченных территорий. Занимая незначительную площадь (около 3–5%) поверхности суши, болотные экосистемы играют значительную роль в биосфере, в том числе в глобальном круговороте углерода, являясь источниками и стоками парниковых газов [2, 22, 37]. Динамика содержания парниковых газов в атмосфере привлекает внимание различных специалистов,

поскольку в современный период наблюдается увеличение концентрации СО₂ в атмосфере, которое в основном связывают с антропогенной деятельностью [24]. В то же время в результате обмена между атмосферой, растительностью, почвами и океанами, рост концентрации парниковых газов в атмосфере составляет меньше половины их поступления из различных источников, за счет способности природных экосистем, в том числе болотных, депонировать углерод. Процесс аккумуляции углерода в торфяных почвах преобладает над процессом его выделения (эмиссии СО₂ и СН₄) за счет медленного процесса разложения растительных остатков, по сравнению с образованием фитомассы, что обуславливает постоянный прирост торфяной залежи и развитие болотных экосистем [20, 39].

Этот процесс накопления органического вещества в почве выполняет важнейшую функцию регулирования климата, удерживая углерод на длительный (десятки тысяч лет) период. Однако одновременно с этим в торфяных почвах формируются анаэробные условия, которые способствуют образованию и последующему выделению метана. С одной стороны, уровень болотных вод (УБВ) контролирует степень насыщения почвы, которая создает анаэробные условия, вызывающие биохимическое ингибирование процесса трансформации торфа [20] и производство CH_4 [16], с другой стороны, растения, как основной источник органического вещества, контролируют депонирование углерода, определяя количество и качество органического вещества, которое подвергается разложению [18]. Из-за двойственного воздействия торфяников на потоки углерода (активное поглощение и депонирование в виде торфа, с одной стороны, и высокая эмиссия CO_2 и метана, с другой стороны) прямая оценка климатической роли торфяников затруднена и возможна только с учетом одновременных измерений всех элементов углеродного баланса, либо с помощью математического моделирования [27, 29]. В то же время одним из способов оценки климатической роли болотных экосистем и их уязвимости к климатическим изменениям является метод оценки с помощью отношения депонирования углерода к выбросам парниковых газов, которое представляет собой соотношение между вкладом отрицательного и положительного радиационного воздействия [30]. Чем ниже полученный коэффициент, тем выше потенциальное негативное воздействие на экосистему и, соответственно, тем меньше роль болотных экосистем в регулировании климата.

На территории Западной Сибири площадь болотных экосистем составляет около 50% [2, 7, 13]. Несмотря на то, что крупные болотные массивы, распространенные в Западной Сибири, считаются устойчивыми к наблюдаемым климатическим изменениям, эти изменения могут оказать серьезное воздействие на гидрологический режим болотных экосистем и их экосистемные функции, в том числе регулирование климата [31, 33].

В настоящем исследовании оценивали запасы углерода и изменчивость потоков парниковых газов (CO_2 и CH_4) в пределах олиготрофного болота южно-таежной подзоны Западной Сибири в зависимости от видового состава растительности и гидрологического режима почв. Результаты использовали для оценки уязвимости олиготрофного болота к текущим тенденциям изменения температур воздуха и сумм атмосферных осадков.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты и природные условия района исследования. Объектами исследования явились две типичные олиготрофные торфяные почвы (Fibric Histosols), развивающиеся на олиготрофном болотном массиве (Бакчарское болото) в южно-таежной подзоне Западной Сибири [6, 9]. Исследуемый болотный массив расположен на водоразделе двух малых рек – Бакчар и Икса (рис. 1). Район водораздела представляет собой северо-восточную ветвь крупнейшей системы водно-болотных угодий в мире – Большого Васюганского болота. Согласно классификации растительного покрова по спутниковым снимкам Landsat 7 [19] установлено, что около 37% площади водосбора занимают болота, 30% из них представлены олиготрофными болотами и только 7.4% – эвтрофными. Среди олиготрофных болот преобладали открытые (15%) и лесные (14.9%).

Первая торфяная почва развивалась на открытом осоково-сфагновом болоте (56°58'14.6" E, 82°37'10.3" N). В растительном покрове преобладали *Eriophorum vaginatum* L. и *Carex rostrata* Stokes. (проективное покрытие 64%). Моховой покров был представлен различными видами сфагновых мхов (*Sph. angustifolium* (Russ.) C. Jens., *Sph. magellanicum* Brid, *Sph. fuscum* (Schmp.) Klinggr.), образующих сплошной покров. Глубина торфяной почвы достигала 3 м. Торфа, слагающие профиль торфяной почвы до глубины 1 м, были представлены верховым сфагновым торфом, затем шел слой переходного торфа, представленного древесным и древесно-осоковым видами, а в основании залегал слой эвтрофного торфа хвощового вида.

Вторая торфяная почва развивалась на залесенном болоте (56°58'32.2" E, 82°36'29.7" N), растительность которого была представлена сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом. В современном растительном покрове преобладали *Pinus sylvestris* L. f. *litwinowii* Sukacz, (средняя высота деревьев 2–3 м) и кустарничковый ярус с *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* L., *Andromeda polifolia* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Oxycoccus microcarpus* L. В моховом покрове на кочках *Sph. fuscum* (95%), а в межкочковых пространствах преобладали *Sph. angustifolium* и *Sph. magellanicum*. Травяной ярус был слабо развит (5%) и представлен скоплениями *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L., *Drosera rotundifolia* L. Глубина торфяной почвы достигала 2 м. Верхний 1-метровый слой торфяной почвы был сложен верховыми сфагновыми торфами (преимущественно *Sph. magellanicum* и *Sph. fuscum*), затем следовал тонкий слой мезотрофного торфа древесно-сфагнового и древесно-осокового видов, в основании залегал слой низинного древесного торфа.

Методы исследования. Оценка биологического разнообразия. При выполнении геоботанического

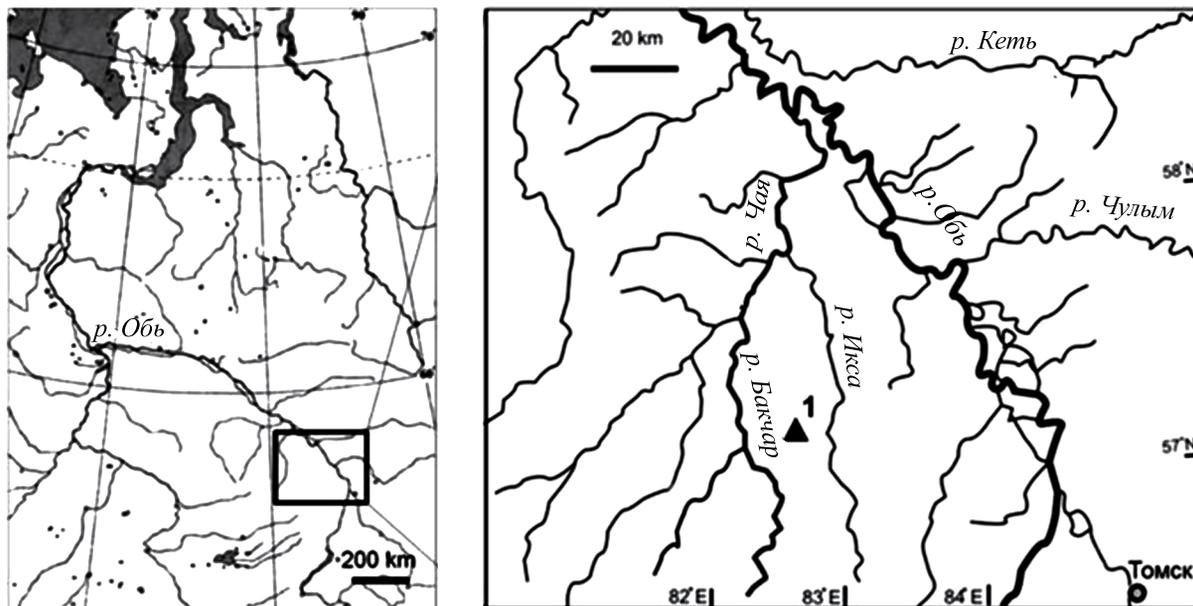


Рис. 1. Карта-схема района исследований.

описания растительного покрова исследуемых фитоценозов проводили учет видов растений и их встречаемости на пробных площадках размером 10×10 м (при наличии древесного яруса) и 5×5 м на открытых осоково-сфагновых участках. Всего было выполнено 10 геоботанических описаний. Обилие растений оценивали в баллах модифицированной шкалы Браун-Бланке. Количество отдельных экземпляров растений определяли методом сплошного пересчета на учетных площадках 2×2 м для травяно-кустарникового яруса и 10×10 см для мохового покрова. Оценку биологического разнообразия исследуемых фитоценозов выполняли с помощью индекса Шеннона-Уивера (H) [35]. Несходство видового состава исследуемых фитоценозов оценивалось по коэффициенту Брэя-Кертиса (БК) [14].

Оценка запасов и скорости депонирования углерода. Для определения запасов углерода в исследуемых торфяных почвах проводили послойный отбор почвенных образцов (с интервалом 10 см) ручным геологическим буром ТБГ-1, всего отобрано по 3 торфяных керн на каждом участке. Для расчетов запасов углерода в почвах в отобранных образцах определяли плотность (объемно-весовым методом [1]) и содержание углерода (методом Тюрина в модификации Пономаревой и Николаевой [12]). Все анализы выполняли в лаборатории мониторинга лесных экосистем ИМКЭС СО РАН (аналитик О.Э. Печень-Песенко). По данным о плотности и содержанию углерода в торфе рассчитывали запасы углерода для каждого 10-сантиметрового слоя по формуле:

$$C_{\text{soil}} = C \rho 1000,$$

где C_{soil} — суммарные запасы углерода, г/м^2 ; ρ — плотность горизонта, г/см^3 ; C — содержание органического углерода, %.

Измерение потоков парниковых газов. Измерение эмиссии парниковых газов проводили камерным методом. Эмиссию CO_2 измеряли 2 раза в месяц с мая по сентябрь с 1999 по 2012 гг., эмиссию метана исследовали в том же режиме с 2011 по 2014 гг. На каждой исследуемой торфяной почве был выбран участок с однородным растительным покровом и преобладающей формой микрорельефа: для залесенного болота — это выравненная поверхность, покрытая *Sph. fuscum*, для открытого болота — поверхность, покрытая *Sph. angustifolium*. На выбранных участках на предварительно установленные основания площадью 590 см^2 с канавкой для гидроизоляции устанавливали три непрозрачные цилиндрические камеры объемом 16.6 л. Основания осторожно закладывали в торф на глубину 10 и 20 см (на открытом и залесенном болоте соответственно) за несколько дней до начала эксперимента. Перемешивание воздуха в камере осуществляли электровентилятором на 12 В. Эмиссию CO_2 измеряли с помощью инфракрасного газоанализатора Оптогаз-500.4 (Санкт-Петербург, Россия). Данные измерений объемной доли CO_2 регистрировали с периодичностью 1 измерение в секунду. За время экспозиции (5–15 мин) рост концентрации CO_2 в камере линейен. Полученные данные аппроксимировали линейной зависимостью и по углу наклона аппроксимирующей прямой определяли скорость изменения объемной доли CO_2 в камере (f , ppm/ч). Для измерения потоков CH_4 пробы

Таблица 1. Характеристика погодных условий Бакчарского района по данным метеостанции “Бакчар” (средние значения за 1999–2014 гг.)

Параметр	Значение
Среднегодовая температура воздуха, °С	0.93 ± 0.93
Средняя температура воздуха за период вегетации, °С	13.40 ± 1.04
Годовая сумма осадков, мм	544 ± 123
Продолжительность бесснежного периода, дни	181 ± 14
Сумма активных температур ($T > 10^{\circ}\text{C}$), °С	1854 ± 258
Гидротермический коэффициент Селянинова	1.02 ± 0.19
Высота снежного покрова, см	82 ± 20

воздуха из камер отбирали с помощью пластикового шприца объемом 1 мл с трехкратной повторностью сразу после установки камеры на основание и через 30 мин после начала экспозиции. Для определения объемной концентрации CH_4 использовали газовый хроматограф Shimadzu GC-14В с пламенно-ионизационным детектором при следующих условиях: газ-носитель – гелий, набивная колонка – Carboxen-1000 диаметром 2.1 мм и длиной 15 м.

Величину потока (скорость эмиссии) CO_2 и CH_4 с поверхности торфяной залежи рассчитывали по формуле:

$$F = f P M V / (R T S),$$

где F – скорость эмиссии CO_2 (CH_4), мг/(м² ч); P – атмосферное давление, Па; f – скорость роста объемной концентрации CO_2 (CH_4) в камере, ррт/ч; M – молярная масса CO_2 (CH_4), 0.044 (0.016) кг/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8.31 Дж/моль/К; T – температура воздуха, К; V – объем камеры, м³; S – площадь основания, м².

Регистрация потоков CO_2 и CH_4 сопровождалась дополнительными измерениями характеристик окружающей среды: температуры воздуха и торфяной почвы, уровня болотных вод. Температуру торфа измеряли с помощью автономного измерителя профиля температуры [8] на глубинах 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240 см. Мониторинг УБВ проводили с помощью датчика давления (НОВО Water Level Logger U20–001–04), погруженного в воду на фиксированном уровне под поверхностью.

Статистический анализ. Статистическая обработка данных включала оценку всех исследуемых характеристик с помощью описательных статистик. Проверку нулевой гипотезы при сравнении независимых выборочных групп рассматриваемых параметров (содержание и запасы углерода, величина эмиссии CO_2 и CH_4) проводили с помощью

непараметрического U-критерия Уилкоксона. Взаимосвязи между потоками парниковых газов и переменными окружающей среды оценивали с использованием корреляционного анализа и коэффициента Спирмена. Статистическую обработку результатов проводили в приложении SigmaStat 6 (Systat Software, Inc).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика гидротермических условий. Характеристика погодных условий района исследований по данным ближайшей метеостанции “Бакчар” представлена в табл. 1. Исследуемые торфяные почвы существенно различаются по глубине УБВ. На открытом болоте среднее многолетнее значение УБВ (за период 1999–2014 гг.) составляет 4.7 ± 2.8 см ниже поверхности, на залесенном болоте – 18.4 ± 7.8 см. Почва открытого болота прогревается сильнее по сравнению с залесенным болотом, и характеризуется большей температурой на глубине от 10 до 80 см ($P < 0.001$) по сравнению почвой залесенного болота.

Биоразнообразие. Всего на исследуемых участках было определено 15 видов растений, 12 видов в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе и 11 видов на осоково-сфагновом. Из описанных видов растений 8 видов встречаются на обоих участках, однако они значительно различаются по морфологическим признакам. Оценку биоразнообразия по индексу Шеннона проводили с учетом и без учета сфагновых мхов, так как количество сфагновых мхов существенно превышает все остальные виды вместе взятые (рис. 2). Индекс разнообразия Шеннона был выше на открытом болоте ($H = 1.89$) по сравнению с залесенным ($H = 1.21$), что, при достаточно большом количестве одинаковых видов на обоих болотах, связано с их морфологическими особенностями, вызванными приспособлением к разным гидрологическим условиям. Исключение сфагновых мхов при расчете индексов позволяет оценить разнообразие

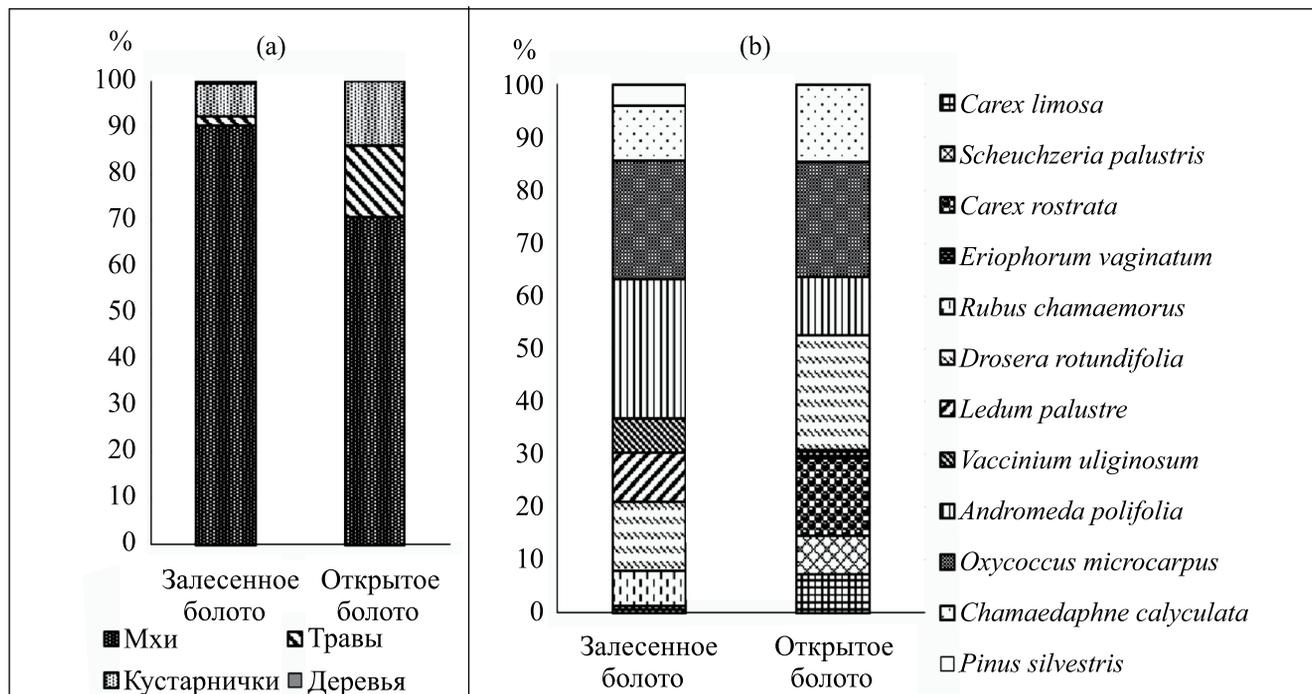


Рис. 2. Относительное обилие видов растений на двух фитоценозах: а – по ярусам растительного покрова; б – видовое обилие, без учета сфагновых мхов.

и выравненность древесно–травяно–кустарничкового яруса. Несходство Брэя–Кертиса между двумя экосистемами с учетом сфагновых мхов показало высокое значение (0.76). При исключении сфагновых мхов из расчета, коэффициент Брэя–Кертиса снижается (0.52).

Содержание и запасы углерода в торфяных почвах. Данные по содержанию углерода в исследуемых почвах приведены в табл. 2. Несмотря на то, что исследуемые почвы существенно отличаются по видовому составу торфов, слагающих торфяные горизонты, содержание углерода в них имеет близкие значения и варьирует в пределах 39.33–46.10% в торфяной почве залесенного болота и 39.75–48.92% в почве открытого болота. Распределение углерода по глубине торфяного профиля исследуемых почв также характеризуется общими закономерностями: отмечается низкое содержание углерода в верхнем слое 0–50 см, с глубиной оно постепенно увеличивается, достигая максимальных значений на глубинах 110–150 см. Запасы углерода в торфяных почвах зависят от плотности сложения. Плотность сложения верхних слоев почв исследуемых болот сильно различается: в почвах залесенного болота она составляет в среднем 0.047 г/см^3 , а открытого болота – 0.034 г/см^3 . В почве залесенного болота в слое 0–50 изменения плотности незначительные, более плотные верхние 10 см – 0.05 г/см^3 , затем плотность несколько снижается и достигает значений 0.045 г/см^3 . В почве

открытого болота верхние 0–30 см из-за более разреженного сфагнового покрова характеризуются наименьшими значениями плотности – 0.02 г/см^3 , но уже в слое 30–50 см происходит значительно уплотнение сфагнового торфа, и плотность увеличивается в 2.7 раза и достигает 0.055 г/см^3 .

Запас углерода в исследуемых торфяных почвах в слое 0–50 см составляет 9.3 ± 0.5 и $6.8 \pm 0.3 \text{ кг/м}^2$ (различия запасов углерода достоверны при уровне значимости $p < 0.05$), на залесенном и открытом болотах соответственно. Наиболее значимые различия в запасах углерода исследуемых торфяных почв наблюдаются в верхних горизонтах (от поверхности до 30 см), где плотность сложения на открытом болоте ниже в 2.5 раза по сравнению с залесенным участком, за счет чего запас углерода в 1.4 раза выше на залесенном участке.

Эмиссия парниковых газов. Определяемый в настоящей работе поток CO_2 с помощью темновой камеры представляет собой суммарное экосистемное дыхание, включающее дыхание почвы, корней и части наземной растительности, попадающей в камеру. При исследовании в камере сохранялся моховой покров, а сосудистые растения внутри камеры удаляли. Экосистемное дыхание является важным показателем интенсивности обменных процессов и контролируется как гидротермическими условиями, так и характеристиками биомассы растительности и почвенного углерода.

Таблица 2. Содержание и запасы углерода в исследуемых торфяных почвах

Почва	Мощность торфяной почвы, см	Содержание углерода, % среднее (min–max)	Плотность торфа, г/см ³ среднее (min–max)	Запас углерода в слое 0–50 см, кг/м ²	Запас углерода во всей торфяной почве, кг/м ²
Торфяно-глеевая олиготрофная на залесенном болоте	180	41.8 (39.3–46.1)	0.085 (0.042–0.157)	9.3	65
Торфяно-глеевая олиготрофная на открытом болоте	300	45.8 (39.8–48.9)	0.080 (0.018–0.125)	6.8	110

Потоки CO₂ имеют четко выраженный сезонный ход (рис. 3а), обусловленный гидротермическими условиями вегетационного периода и сезонным развитием растительности. Среднемесячная интенсивность эмиссии варьирует от 100 до 253 мг CO₂/(м² ч) и от 82 до 240 мг CO₂/(м² ч) на залесенном и открытом болоте соответственно. Следует отметить, что эмиссия CO₂ в большинстве случаев интенсивнее с поверхности почвы залесенного болота, за исключением мая и июня, когда поток CO₂ был интенсивнее из почвы открытого болота. В целом, изменчивость потоков CO₂ увеличивается во всех исследуемых экосистемах в сухие годы, во влажные, как правило, снижается. Выявленная закономерность подтверждается и другими исследованиями [17, 28, 36]. Это свидетельствует, что УБВ является важным определяющим параметром межгодовой изменчивости нетто-экосистемного обмена болотных экосистем и в итоге влияет на годовой баланс CO₂. Однако проведенный

анализ не выявил строгой зависимости эмиссии CO₂ от УБВ. Например, в умеренно влажные и сухие годы наблюдалась отрицательная связь между УБВ и эмиссией CO₂, т.е. при высоких значениях УБВ интенсивность эмиссии снижалась. Тогда как в годы с высокими значениями УБВ зависимость становилась положительной.

Временная изменчивость эмиссии CO₂ контролируется температурой торфа и воздуха [25, 28, 36, 38, 40], так как основное количество CO₂ образуется у поверхности торфяной залежи [23, 25]. Согласно [4], максимальный вклад в поток CO₂ с поверхности торфяной залежи вносит верхний аэробный слой торфа (около 60% от общего потока). Проведенный корреляционный анализ выявил положительную зависимость между эмиссией CO₂ и температурой воздуха ($r = 0.63$). Взаимосвязь эмиссии CO₂ с температурой воздуха оценивали с помощью регрессионного анализа (рис. 3б), используя экспоненциальную зависимость [21] вида:

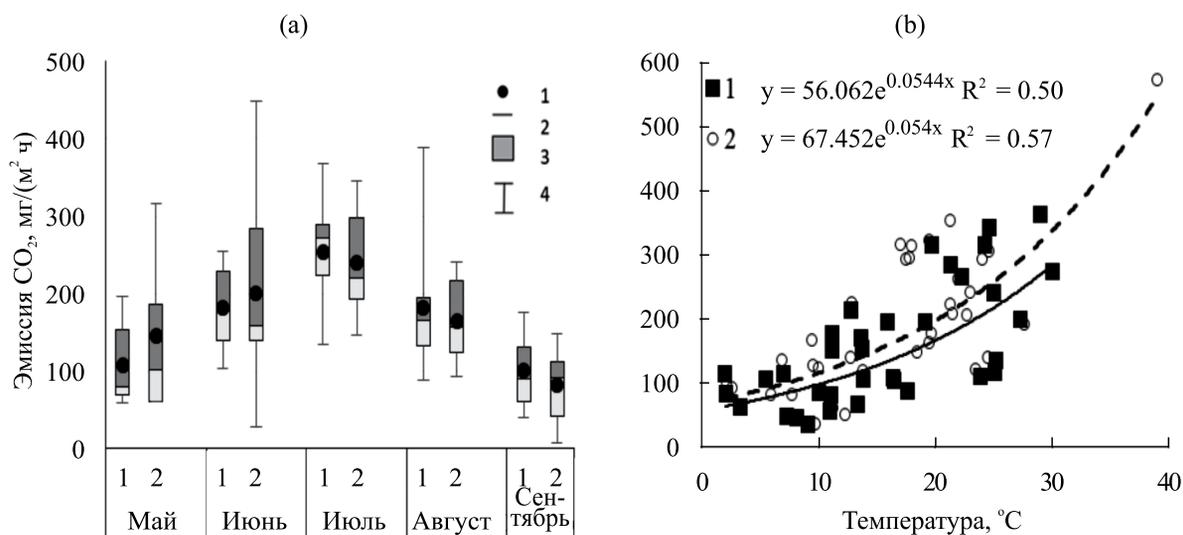


Рис. 3. Средняя месячная эмиссия CO₂ за десятилетний период: 1 – среднее, 2 – медиана, 3 – 25–75%, 4 – минимум (а); связь между эмиссией CO₂ и температурой воздуха на исследуемых торфяных почвах: 1 – залесенное болото, 2 – открытое болото (б).

Таблица 3. Средняя интенсивность эмиссии и средний суммарный поток CO₂ (1999–2012 гг.) и CH₄ (2011–2014 гг.) в исследуемых торфяных олиготрофных почвах южно-таежной подзоны Западной Сибири

Почва	Эмиссия, мг/(м ² ч) X ± SD		Суммарный поток, г/м ² за вегетационный период		Депонирование углерода в торфе г С/м ² в год [6]	Отношение депонирования к потоку	
	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄		CO ₂	CH ₄
Торфяно-глеевая олиготрофная на залесенном болоте	116.1 ± 27.0	0.57 ± 0.38	140.7 ± 4.9	1.10 ± 0.32	101	0.72	91.8
Торфяно-глеевая олиготрофная на открытом болоте	123.4 ± 39.4	2.66 ± 4.58	161.4 ± 5.3	6.60 ± 1.32	79	0.48	11.9

$$F = a \exp(b T),$$

где F – интенсивность эмиссии CO₂, мг/(м² ч); T – температура воздуха, a и b – константы. Коэффициент b отражает чувствительность эмиссии к температуре. Согласно полученным расчетам, и для залесенного, и для открытого болот наблюдается одинаковая чувствительность к изменению температурного режима. Выявленные отношения использовали для восстановления потока CO₂ в течение вегетационного периода и расчета суммарного потока CO₂ с поверхности торфяных почв (табл. 3).

Углерод, депонированный в более глубоких горизонтах торфяных почв при изменении климатических условий, может быть выделен в атмосферу, за счет активизации процессов трансформации органического вещества. В лабораторных экспериментах по оценке продуцирования CO₂ разными типами торфа на разных глубинах залесенного и открытого болота показано, что выделение CO₂ из торфов, слагающих исследуемые торфяные почвы, было выше в торфах открытого болота [5]. Таким образом, за счет потенциальной эмиссии CO₂ из глубоких слоев торфяных почв при смене анаэробных условий, например, в результате осушения и снижения уровня болотных вод, возможно увеличение эмиссии CO₂ с поверхности на 25–28% [5].

Эмиссия CH₄ с поверхности исследуемых почв, так же, как эмиссия CO₂, характеризуется пространственной и временной изменчивостью: за период наблюдений эмиссия CH₄ из почвы открытого болота изменялась от –0.08 до 26.57 мг/(м² ч), а из почвы залесенного болота – от –0.08 до 4.86 мг/(м² ч). При этом эмиссия CH₄ с поверхности почвы на открытом болоте была всегда выше (среднее многолетнее значение – 2.66 и 0.57 мг/(м² ч) для открытого и залесенного болота соответственно), эта разница всегда статистически значима ($p < 0.001$) (табл. 3). Полученные данные хорошо согласуются с литературными. Например, согласно исследованиям [3], потоки метана из почв залесенных болот и открытых

топей варьируют от –0.39 до 7.40 мг/(м² ч) и от –4.73 до 24.39 мг/(м² ч) соответственно. Наилучшим образом полученные данные согласуются с оценками, представленными в работе [11], где медианные значения эмиссии CH₄ торфяными почвами аналогичного типа в летне-осенний период измерений составили 0.56 и 2.87 мг/(м² ч) соответственно. Более высокие значения эмиссии метана приводятся в исследовании [10] для торфяных почв средней тайги (0.60 и 4.29 мг/(м² ч) для залесенных и открытых болот соответственно), однако выдерживается соотношение в потоках на болотах разного типа.

Эмиссия CH₄ из исследуемых торфяных почв характеризуется сезонной изменчивостью с максимальными значениями в июле. Наиболее отчетливая сезонная изменчивость выявлена для торфяной почвы открытого болота. Здесь эмиссия в июле в среднем составила 4.01 ± 5.77 мг/(м² ч), и это значение превышает величину эмиссии в мае и сентябре в 3.5–4 раза ($p < 0.001$). В почве залесенного болота сезонная динамика эмиссии имеет более сглаженный характер: потоки в июле превышали потоки в мае и сентябре в 1.5 раза, но эта разница была статистически недостоверной.

Для выявления факторов, определяющих временную вариацию потока CH₄, были рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена между потоками CH₄ и ключевыми характеристиками окружающей среды. Согласно полученным данным, эмиссия CH₄ из исследуемых почв не зависела от флуктуаций УБВ, тогда как влияние температуры почвы (на глубине 10 см на открытом болоте и 40 см на залесенном болоте) на изменчивость потоков CH₄ с поверхности обеих почв более выражено (рис. 4). Учитывая, что высокие значения эмиссии CH₄ с поверхности торфяной почвы открытого болота наблюдались в середине лета, температура этого слоя может отражать общую сезонную тенденцию роста и развития растительности на болоте. Например, в работе [34] показано, что сосудистые растения участвуют в сезонных колебаниях потоков CH₄

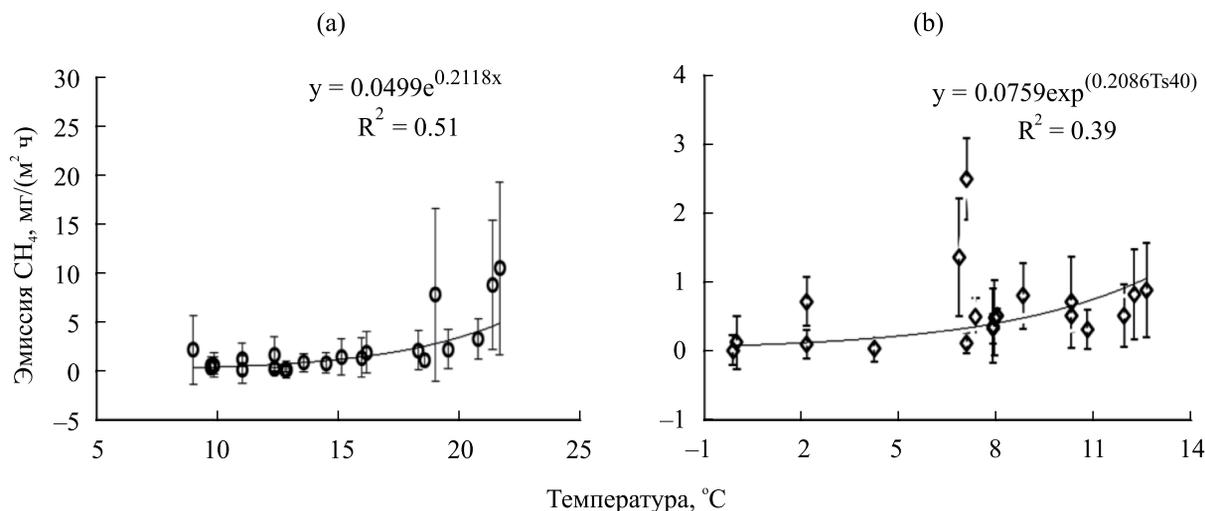


Рис. 4. Корреляционные зависимости между средней суточной эмиссией CH₄ и температурой почвы (а) – торфяная почва открытого болота на глубине 10 см и (б) – торфяная почва залесенного болота на глубине 40 см.

за счет увеличения подачи субстрата для метаногенеза. При этом, согласно работы [34], наибольшие потоки наблюдались на пике вегетации. Исходя из этого, становится понятным, почему в сентябре с понижением температуры и началом отмирания растительности наблюдалось систематическое снижение интенсивности потока CH₄. В мае болотная вода разбавляется талой и атмосферной водой, что приводит к образованию водного слоя с низкой концентрацией растворенного CH₄. Это замедляет диффузию CH₄ через матрицу торфа в верхние слои, так как диффузия в воде происходит медленнее, чем в порах, заполненных воздухом [32]. Кроме того, из-за флуктуации УБВ в торфяной почве залесенного болота могут наблюдаться переменные окислительно-восстановительные условия, при которых происходит попеременное окисление, либо генерация метана [15]. Полученные данные о потоках CH₄ с поверхности залесенного болота согласуются с результатами, полученными для аналогичных болотных экосистем (Mer Bleue, Канада) [26].

Выявленные зависимости между температурой торфяных слоев и потоком CH₄ были использованы для оценки общих потоков CH₄ (табл. 3). Результаты показали существенные различия в сезонных суммарных потоках CH₄ с поверхности торфяных почв исследуемых экосистем.

Роль болотных экосистем в депонировании углерода и их устойчивость к климатическим изменениям. Для оценки роли экосистемы в качестве источника или поглотителя парниковых газов необходимо учитывать все составляющие углеродного баланса, поскольку основываясь только на измерениях эмиссии парниковых газов легко получить недостоверную оценку. Отношение современного депонирования углерода в торфе к потокам

парниковых газов можно использовать для оценки уязвимости экосистем к изменению климата в условиях Западной Сибири. Поскольку это соотношение сочетает количественную оценку основных климаторегулирующих функций (депонирование углерода и выбросы CO₂ и CH₄) и структурных компонентов (растительный покров), оказывающих влияние на эти функции. Можно предположить, что диапазоны отношений представляют собой пределы, в которых эти функции и структура сохраняются при естественных возмущениях. При этом более узкие отношения можно интерпретировать как низкую устойчивость, а более широкие отношения – как высокую устойчивость. Для потока CO₂ это соотношение меньше единицы, с более высоким значением на залесенном болоте, а для потока CH₄ различия между экосистемами существенные, на залесенном болоте оно равно 93, а на открытом болоте, где поток CH₄ в 6 раз выше, это соотношение равно 8. Таким образом, можно сделать вывод о большей уязвимости открытых болот к климатическим изменениям. В работе [29], предложена оценка устойчивости болотных экосистем, которая основана на времени переключения экосистемы из одного состояния в другое, т.е. из источника парниковых газов в поглотитель. Показано, что в пресноводных водно-болотных угодьях на минеральных почвах, для которых получено соотношение депонирования углерода к потоку CH₄ 0.1–25, время переключения экосистем будет варьироваться от ~ 60 до 14000 лет. С учетом сказанного, а также с учетом возраста исследуемых торфяных почв (2900 и 7900 лет для залесенного и открытого болот соответственно), Бакcharское болото можно считать чистым поглотителем парниковых газов. Это подтверждается исследованиями баланса углерода на данной территории [7].

В долгосрочной перспективе результаты влияния изменения климата на скорость депонирования углерода торфяными почвами и интенсивность выделения парниковых газов сложно прогнозировать. Так как при потеплении и снижении УБВ может произойти смена видового состава растительного покрова, что может способствовать увеличению потока парниковых газов. Однако одновременно с этим увеличится и поглощение углерода растительностью, что приведет к росту скорости депонирования углерода. Кроме того, понижение УБВ может привести к ускорению процесса трансформации аэробных торфяных слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование запасов углерода, а также темпов эмиссии парниковых газов (CO_2 и CH_4) в торфяных почвах двух контрастных болотных экосистем (залесенное болото и открытое болото) Западной Сибири показало, что для исследуемых торфяных почв характерны близкие значения интенсивности эмиссии CO_2 (116.1 ± 27.0 и 123.4 ± 39.4 мг $\text{CO}_2/(\text{м}^2 \text{ ч})$) для почв залесенного и открытого болот соответственно, различия статистически значимы при $p < 0.05$), но в то же время величина эмиссии CH_4 значительно различается для этих почв (0.57 ± 0.38 и 2.66 ± 4.58 мг $\text{CH}_4/(\text{м}^2 \text{ ч})$ соответственно ($p < 0.05$)).

Запасы углерода в исследуемых торфяных почвах в слое 0–50 см составляют 9.3 ± 0.5 и 6.8 ± 0.3 кг/м² ($p < 0.05$) на залесенном и открытом болотах соответственно, за счет большей плотности торфа в верхних горизонтах торфяной почвы залесенного болота. Запасы углерода и интенсивность потоков парниковых газов зависят от гидротермических условий, а также от характера растительного покрова.

Оценка климатической роли болотных экосистем и их уязвимости к климатическим изменениям по отношению депонирования углерода к выбросам метана показала, что в целом исследуемые болота являются устойчивыми к наблюдаемым изменениям климата. Однако открытое болото более уязвимо к климатическим изменениям, так как скорость депонирования углерода в торфяной почве в 1.3 раза ниже по сравнению с залесенным болотом, при этом интенсивность выделения метана в 6 раз выше.

Результаты исследований указывают на важную роль видового состава растительности и гидрологического режима торфяных почв, сформированных в разных болотных экосистемах региона в процессах депонирования углерода и потоков парниковых газов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах” (№ 123030300031–6).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базин Е.Т., Копенкин В.Д., Косов В.И., Корчунов С./С., Петрович В.М.* Технический анализ торфа. М.: Недра, 1992. 431 с.
2. *Волперский С.Э.* Роль болот в круговороте углерода // Чтения памяти академика В.Н. Сукачева. XI. Биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука, 1994. 37 с.
3. *Глаголев М.В., Шнырев Н.А.* Летне-осенняя эмиссия CH_4 естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2008. № 2. С. 24–36.
4. *Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А.* Интенсивность продуцирования CO_2 сфагновыми торфами в нативных условиях // Материалы Второго междунар. полевого симп. “Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее”. Ханты-Мансийск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 130–131.
5. *Головацкая Е.А.* Интенсивность продуцирования углекислого газа торфами олиготрофного болота // Материалы докл. “Одиннадцатое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу”. Томск, 2015. С. 105–106.
6. *Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г., Смирнов С.В.* Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. № 5(4). С. 1–18. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194>
7. *Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Мелентьева Н.В.* Запасы углерода в экосистемах болот // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск, 1994. С. 128–139.
8. *Кураков С.А., Крутиков В.А., Ушаков В.Г.* Автономный измеритель профиля температуры АИПТ // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 166–167.

9. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слуга З.А. и др. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
10. Наумов А.В., Косых Н.П., Мироньчева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири // Сиб. экол. журн. 2007. № 5. С. 771–779.
11. Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Мачида Т., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана из болотных комплексов тайги Западной Сибири // Почвоведение. 2014. № 1. С. 58–70. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14010092>
12. Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Воробьевой Л.А. М.: ГЕОС, 2006 г. 400 с.
13. Титлянова А.А., Булавко Г.И., Кудряшова С.Я., Наумов А.В., Смирнов В.В., Танасиенко А.А. Запасы и потери органического углерода в почвах Сибири // Почвоведение. 1998. № 1. С. 51–59.
14. Baiser B., Lockwood J.L. The relationship between functional and taxonomic homogenization // Global Ecology and Biogeography. 2011. V. 20(1). P. 134–144. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00583.x>
15. Blodau C., Siems M. Drainage-induced forest growth alters belowground carbon biogeochemistry in the Mer Bleue bog Canada // Biogeochemistry. 2012. V. 107. P. 107–123. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9535-1>
16. Bridgham S.D., Cadillo-Quiroz H., Keller J.K., Zhuang Q. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales // Glob. Chang. Biol. 2013. V. 19. P. 1325–1346. <https://doi.org/10.1111/gcb.12131>
17. Bubier J.L., Crill P.M., Mosedale A., Frohling S., Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO₂ chambers // Global Biogeochem. Cycles. 2003. V. 17. № 2. P. 1066. <https://doi.org/10.1029/2002GB001946>
18. de Graaff M.-A., Jastrow J.D., Gillette S., Johns A., Wulfschlegel S.D. Differential priming of soil carbon driven by soil depth and root impacts on carbon availability // Soil Biol. Biochem. 2014. V. 69. P. 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.047>
19. Dyukarev E.A., Alekseeva M.N., Golovatskaya E.A. A study of the vegetation cover of bog ecosystems by satellite data // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2017. V. 53. P. 1029–1041. <https://doi.org/10.1134/S0001433817090092>
20. Freeman C., Ostle N.J., Fenner N., Kang H. A regulatory role for phenol oxidase during decomposition in peatlands // Soil Biol. Biochem. 2004. V. 36. P. 1663–1667. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.012>
21. Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. Carbon budget of oligotrophic bog in southern taiga in Western Siberia // Plant and Soil. 2009. V. 315. P. 19–34.
22. Gorham E. Canada's peatlands: their importance for the global carbon cycle and possible effects of "greenhouse" climatic warming // Trans. Royal Soc. Canada. Ser. V. 1988. V. 3. P. 21–23. <https://doi.org/10.2307/1941811>
23. Hirano T. Seasonal and diurnal variations in topsoil and subsoil respiration under snowpack in a temperate deciduous forest // Global Biogeochem. Cycles. 2005. V. 19. P. GB2011. <https://doi.org/10.1029/2004GB002259>
24. IPCC, 2021: Index. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf (дата обращения 03.12.2022).
25. Lafleur P.M., Moore T.R., Roulet N.T., Frohling S. Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on peat temperature but not water table // Ecosystems. 2005. V. 8. P. 619–629. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0131-2>
26. Lai D.Y.F., Moore T.R., Roulet N.T. Spatial and temporal variations of methane flux measured by autochambers in a temperate ombrotrophic peatland // J. Geophys. Res. 2014. V. 119 P. 864–880. <https://doi.org/10.1002/2013JG002410>
27. Mitsch W.J., Bernal B., Nahlik A., Mander Ü., Zhang L., Anderson C., Jørgensen S. et al. Wetlands, carbon, and climate change // Landsc. Ecol. 2013. V. 28. P. 583–597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
28. Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils // J. Soil Sci. 1993. V. 44. P. 651–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb02330.x>
29. Neubauer S. On the challenges of modeling the net radiative forcing of wetlands: reconsidering Mitsch et al. 2013 // Landsc. Ecol. 2014. V. 29. P. 571–577. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-9986-1>
30. Neubauer S., Megonigal J.P. Moving beyond global warming potentials to quantify the climatic role of ecosystems // Ecosystems. 2015. V. 18. P. 1000–1013. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9879-4>
31. Poveda, G., Álvarez, D.M., Rueda, Ó.A. Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots // Clim. Dyn. 2011. V. 36. P. 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
32. Rinne J., Tuittila E.S., Peltola O., Li X., Raivonen M., Alekseychik P., Haapanala S., Pihlatie M. et al.

- Temporal variation of ecosystem scale methane emission from a boreal fen in relation to temperature, water table position, and carbon dioxide fluxes // *Global Biogeochem. Cycles*. 2018. V. 32. P. 1087–1106. <https://doi.org/10.1029/2017GB005747>
33. Ruiz, D., Moreno, H.A., Gutiérrez, M.E., Zapata, P.A. Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 398(1–3). P. 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.038>
 34. Saarnio S., Alm J., Martikainen P.J., Silvola J. Effects of raised carbon dioxide on potential methane production and oxidation in, and methane emission from a boreal mire // *J. Ecology*. 1998. V. 86. P. 261–268.
 35. Shannon C.E., Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: The University of Illinois Press, 1949. P. 1–117.
 36. Strack M., Waddington J.M. Response of peatland carbon dioxide and methane fluxes to a water table drawdown experiment // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2007. V. 21. № 1. <https://doi.org/10.1029/2006GB002715>
 37. Succow M. *Landschafts ökologische Moorkunde*. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers, 2001. 622 p.
 38. Updegraff K., Bridgham S.D., Pastor J., Weishampel P. Hysteresis in the temperature response of carbon dioxide and methane production in peat soils // *Biogeochemistry*. 1998. V. 43. P. 253–272. <https://doi.org/10.1023/A:1006097808262>
 39. Wang Y., Wang H., He J.-S., Feng X. Iron-mediated soil carbon response to watertable decline in an alpine wetland // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. P. 15972.
 40. Wickland K.P., Striegl R.G., Mast M.A., Clow D.W. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998 // *Global Biogeochem. Cycles*. 2001. V. 15(2). P. 321–335.

Greenhouse Gas Fluxes and Carbon Storages in Oligotrophic Peat Soils of Western Siberia

E. A. Golovatskaya^{1, *}, E. E. Veretennikova^{1, 2}, and E. A. Dyukarev^{1, 3}

¹*Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Tomsk, 634055 Russia*

²*Siberian State Medical University, Tomsk, 634055 Russia*

³*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, 628012 Russia*

*e-mail: golovatskayaea@gmail.com

The carbon reserves (C) and the rates of emission of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) in peat soils of Western Siberia have been studied. The peat soils are typical for region oligotrophic ones (Histosols), but they develop in two contrasting bog ecosystems (a forested bog and an open bog), therefore, they differ significantly in modern vegetation cover, soil profile structure, hydrological and temperature conditions. It has been shown that the carbon reserves in the studied peat soils in the 0–50 cm layer are 9.3 and 6.8 kg/m² in the forested and open bogs, respectively. Measurements of CO₂ and CH₄ emissions were carried out by the chamber static method during the growing seasons from 1999 to 2014. The results showed that the studied soils release into the atmosphere the same number of CO₂ (116.1 and 123.4 mg/(m² h) for soil in a forested and open bog, respectively), but at the same time significantly differ number of CH₄ (0.57 and 2.66 mg/(m² h), respectively). This research has highlighted an important role of vegetation species composition and hydrological regime in estimates of carbon deposition and greenhouse gas fluxes from peat oligotrophic soils of bog ecosystems in the region.

Keywords: wetland ecosystems, histosols, biodiversity, greenhouse gas emissions, carbon sequestration