

УДК 574.42: 57.017.72: 573.7

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЭМИССИИ CO₂ С ПОВЕРХНОСТИ ВЕРХОВОГО БОЛОТА ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

А.В. Махныкина^{1,2}, Д.А. Полосухина^{1,2}, Р.А. Колосов², А.С. Прокушкин^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Институт леса им. В.Н. Сукачева, ФИЦ «КНЦ СО РАН», Красноярск, Россия



Основываясь на данных прямых инструментальных наблюдений, были рассмотрены динамические процессы сезонной эмиссии CO₂. Был установлен вклад основных факторов среды в формирование потока эмиссии CO₂ с поверхности разных участков болотного массива – гряды и мочажина. Выявлено влияние метеорологических условий конкретного сезона на величину потока CO₂ и лимитирующих его факторов. Наиболее сильная зависимость наблюдалась между скоростью эмиссионного потока и температурой почвы. Зависимость эмиссии CO₂ от условий увлажнения, напротив, довольно слабая для двух участков и нередко отрицательная.

Ключевые слова: эмиссия CO₂, вегетационный сезон, уровень болотных вод, бореальная зона, цикл углерода

Введение

Болотные экосистемы северных регионов, обладая низкой продуктивностью, могут накапливать большие количества углерода ввиду низкой скорости разложения и дыхания [Preston et al., 2012; Gill et al., 2017]. По последним оценкам, на долю болотных экосистем приходится порядка 12 % глобального углеродного пула. На территории северных торфяников сосредоточено около 3 % [Gorham, 1991; Bridgham et al., 2006; Yu et al., 2011] или 500 ± 100 Пг С [Yu, 2012]. Это сопоставимо с текущим содержанием двуокиси углерода (CO₂) в атмосфере, что соответствует ~847 Пг CO₂-С [Le Quéré et al., 2016].

Процессы разложения в этих экосистемах в первую очередь контролируются низкими температурами [Gorham, 1991; Preston et al., 2012; Gill et al., 2017], а также слабой доступностью кислорода, определяемой уровнем болотных вод [Bridgham et al., 1998; Freeman et al., 2001; Preston et al., 2012].

Выступая долгосрочным хранилищем углерода, болотные экосистемы северных регионов подвержены воздействию ряда внешних факторов среды, которые, в свою очередь, могут нарушить равновесное состояние данных экосистем. Ожидается, что изменения климата [IPCC, 2013] приведут к интенсификации ассимиляционной [Holmgren et al., 2015; McPartland et al., 2019] и дыхательной активности и, как следствие, высвобождению дополнительного углерода в атмосферу.

Прогнозирование будущих запасов углерода болот требует базового понимания влияния целого ряда факторов среды и вклада растительного и микробного сообществ болотного массива. Скорость, как и масштаб грядущих изменений, изучены сейчас довольно поверхностно и в основном базируются на модельных оценках климатических сценариев.

Для территории Сибири выполнен ряд работ по изучению болотных экосистем [Efremov, Efremova, 2001; Sheng et al., 2004; Наумов и др., 2007]. Используя данные космоснимков и ГИС, были рассчитаны площади болот и запасы углерода для территории Западной Сибири [Sheng et al., 2004], в более ранних исследованиях, как отмечают авторы, приводились существенно меньшие величины запасов углерода. В работе А.В. Наумова с соавт. [2007] были помимо этого рассмотрены такие характеристики болот, как первичная продуктивность фитоценозов, приведены оценки по бюджету некоторых парниковых газов (метан, углекислый газ), основываясь на прямых измерениях их концентрации. Однако, несмотря на ранее проводившиеся исследования в Приенисейской среднетаежной части Западной Сибири [Глебов, 1969; Карпенко, 1996; Golovatskaya, Dyukarev, 2012; Карпенко, Прокушкин, 2018], значительная площадь болот в бассейнах малых рек остается слабоизученной с точки зрения эмиссионной активности.

На сегодняшний день становится наиболее актуальным вопрос об изменении функциональной роли болотных экосистем северных широт и превращении их из долговременного стока углерода атмосферы в дополнительный его источник. В нашей работе рассматривалась эмиссионная активность верхового болота в течение вегетационного периода. Были также проанализированы основные факторы среды, которые могли оказать существенное влияние на формирование потока CO₂ с поверхности болотного массива.

Объекты и методы

Район исследования. Исследования проводились на территории Туруханского района Красноярского края (Обсерватория ZOTTO, 60°04' с. ш., 89°23' в. д.).

Климат региона резко континентальный, среднегодовая температура воздуха составляет $-3,5^{\circ}\text{C}$. Сумма температур выше 10°C варьирует в пределах 1 200–1 400 $^{\circ}\text{C}$. Самым теплым месяцем года является июль – среднемесячная температура составляет $18,1^{\circ}\text{C}$, среднемесячная температура самого холодного месяца (января) $-23,8^{\circ}\text{C}$. Амплитуда колебания среднемесячных температур может достигать 42°C . Среднегодовое среднее количество осадков за вегетационный сезон (июнь–сентябрь) для данной территории составляет в среднем 260 мм, а для всего года порядка 600 мм. Таким образом, на дождевые осадки за вегетационный сезон приходится около 44 % [Лыжные экосистемы..., 2002].

Объекты исследования. Нами рассмотрена сезонная динамика эмиссии CO_2 с поверхности верхового болота (ряма) (рис. 1). Микрорельеф болотного массива на 90 % образован мощными сфагновыми грядами и буграми из сфагнума бурого и лишь 10 % поверхности занимают слабо обводненные мочажины и межкочечные понижения. Древесный ярус гряд представлен сосной обыкновенной болотной формы *Pinus sylvestris f. litwinowii*. Доля сухостоя составляет 10–15 %. На положительных формах микрорельефа развит кустарничковый ярус, общее проективное покрытие которым составляет 40–50 %. Травяной покров мочажин, представленный осоково-сфагновым фитоценозом, сильно изрежен, проективное покрытие не превышает 20–30 %. Моховой покров мочажин рыхлый, на 100 % образован супергидрофильными сфагновыми мхами [Карпенко, Прокушкин, 2018].

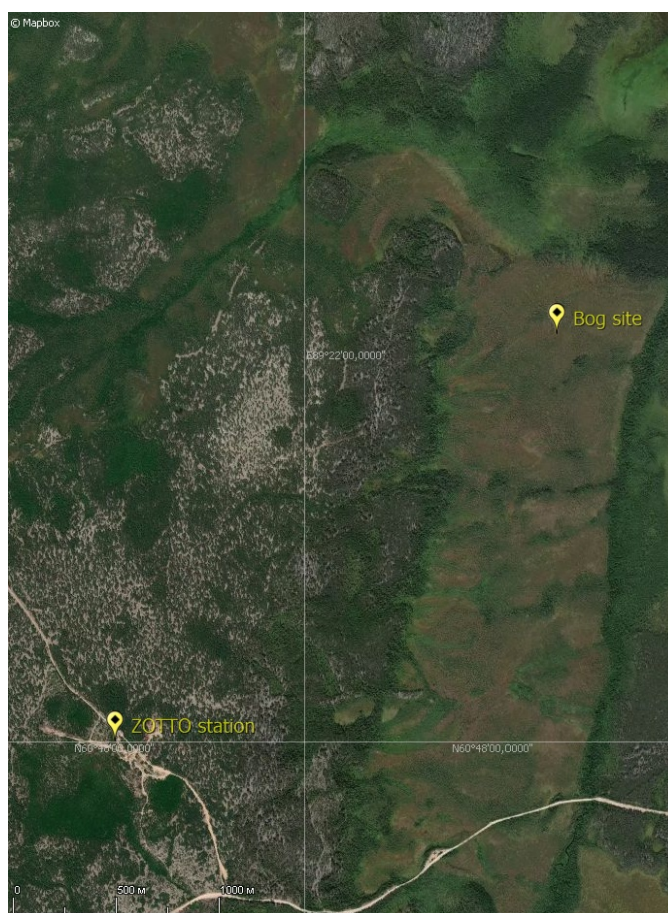


Рис. 1. Карта расположения объектов исследования

Fig. 1. Map of the research objects

Методы исследования. Изучение почвенной эмиссии осуществлялось в течение трех вегетационных сезонов (2018–2020 гг.) на различных по высоте участках болотного массива – грядах и мочажинах. Измерения почвенной эмиссии проводились с использованием инфракрасного газоанализатора LI-8100A (Li-cor Inc., Lincoln, США). Замеры температуры проводились на

трех глубинах – 5, 10 и 15 см от поверхности – с помощью почвенного температурного датчика Soil Temperature Probe Type E (Omega, США). Для измерения объемной влажности SWC (5 см от поверхности) использовался влагомер Theta Probe Model ML (Delta T Devices Ltd., Великобритания). Уровень болотных вод измерялся в течение всего безморозного периода с ис-

пользованием HOBO Water level logger U20L-04 (Onset, США) с периодичностью каждые 10 мин. Сезонные измерения эмиссии CO₂, температуры и объемной влажности проводились с июня по сентябрь включительно, частота замеров в течение сезона составляла один раз в 7–10 дней.

Результаты

Метеорологические характеристики сезонов.

Три измерительных сезона отличались между собой по климатическим характеристикам (рис. 2). Сезон 2018 г. характеризуется достаточно засушливыми условиями: количество осадков составило 191 мм, что на 27 % ниже среднееголетних значений, полученных по метеостанции Бор (61°36' с.ш. 90°00'1 в.д., <http://www.meteo.ru>). Температура в течение сезона 2018 г. была выше, чем среднееголетние значения, на 1,6 °С. Что касается сезонов 2019 и 2020 гг., то средняя температура летнего периода также превышала среднееголетнюю на 1,0 и 2,0 °С соответственно.

По условиям увлажнения сезоны 2019 и 2020 гг. достаточно сходны, а именно количество осадков превышает среднееголетние нормы на 15 и 23 % соответственно. Интересно, что в сезон 2020 г. часто наблюдались сильные дожди (более 10 мм за сутки), которые ранее не отмечались на данной территории.

По температурному режиму почв (таблица) рассмотренные участки существенно отличаются между собой, демонстрируя наибольшие расхождения в более увлажненные сезоны 2019 и 2020 гг. Разница по температуре в эти сезоны составила порядка 1,0 °С, в то время как в сезон 2018 г. с недостаточным увлажнением – 0,5 °С. Данные различия могут быть связаны как со степенью увлажнения участка: участок мочажины практически весь сезон функционирует при 100 %-м увлажнении, также существенную роль играет наличие мощного мохового и травянистого ярусов на участке гряды, что, в свою очередь, способствует локальному росту температуры. Отметим также, что участки гряды и мочажины находятся на расстоянии порядка 40 м друг от друга, что свидетельствует о высокой вариации микроклиматических параметров даже при таких мелкомасштабных измерениях.

Уровень болотных вод, как один из основных факторов развития и функционирования болота в течение вегетационного сезона, изменялся относительно максимального уровня, установленного весной каждого года, в среднем на 0,25 м: в сезон 2018 г. – от 0 до 0,30 м, в сезон 2019 г. – от 0 до 0,15 м, в сезон 2020 г. – от 0 до 0,27 м (рис. 3).

Важно добавить, что уровень болотных вод в течение вегетационного сезона и объемная влажность почв на участке сосняка лишайникового (на глубине 8 см), расположенном в непосредственной близости к исследуемому болотному массиву, меняются достаточ-

но синхронно. Данный факт может свидетельствовать о наличии механизма сопряженного действия двух различных экосистем на изменение внешних климатических условий. Некоторые различия сезонной динамики уровня болотных вод и влажности почв наблюдаются в период максимального роста температуры воздуха, за счет которого, возможно, и происходит резкий спад влажности почв на участке леса (рис. 3).

Сезонные потоки эмиссии CO₂. Максимальные эмиссионные потоки CO₂ на исследованном болотном массиве отмечены в первой половине августа, а самые низкие – с середины сентября. Сезон 2018 г. характеризовался наименьшими значениями эмиссии CO₂ – $2,23 \pm 1,40$ мкмоль CO₂/м²/с и суммой осадков (191 мм), которая была ниже среднееголетних значений на 27 %. В 2019 г. потоки CO₂ с поверхности болота были существенно выше, в среднем за сезон составляя $4,17 \pm 4,55$ мкмоль CO₂/м²/с. При этом количество осадков (302 мм) за сезон превышало среднееголетнюю норму на 36 %. В 2020 г. также при значительном количестве осадков (322 мм) средний поток CO₂ с поверхности болота составил $2,99 \pm 2,06$ мкмоль CO₂/м²/с. Для всех сезонов наблюдений потоки CO₂ на грядах превышали мочажины на более чем на 60 % ($p \leq 0,05$).

Общий сезонный поток с поверхности изучаемых участков болотного массива за три измерительных сезона составил в среднем с гряды $1,62 \pm 0,14$ кг C/м², с поверхности мочажины – $0,55 \pm 0,04$ кг C/м².

Зависимость сезонного потока CO₂ от климатических факторов. Связь эмиссионного потока CO₂ рассматривалась с основными факторами среды – температура почвы, SWC (объемная влажность почвы), уровень болотных вод. Было установлено, что наиболее сильная корреляционная зависимость наблюдалась между скоростью эмиссионного потока и температурой почвы (рис. 5), причем в сезон с количеством осадков ниже среднееголетней нормы – 2018, корреляционная зависимость была выше и r -значение составило 0,6 и 0,8 для участков гряды и мочажины соответственно ($p \leq 0,05$). Отметим, что по самой функциональной зависимости двух переменных для участка гряды была выбрана экспоненциальная функция (как и для лесных экосистем), а для участка мочажины наблюдался четкий линейный рост эмиссии с ростом температуры почвы.

Зависимость эмиссии CO₂ от условий увлажнения напротив, довольно слабая для двух участков и часто отрицательная. На примере 2019 года, можно отметить отрицательную зависимость для мочажины от условий увлажнения ($r = -0,7$, $p \leq 0,05$), однако для участка гряды наблюдалась слабая положительная зависимость ($r = 0,2$, $p \leq 0,05$). Данная особенность функционирования напрямую связана с обводненными условиями, которые приводят к угнетению процесса выделения CO₂ с поверхности болота.

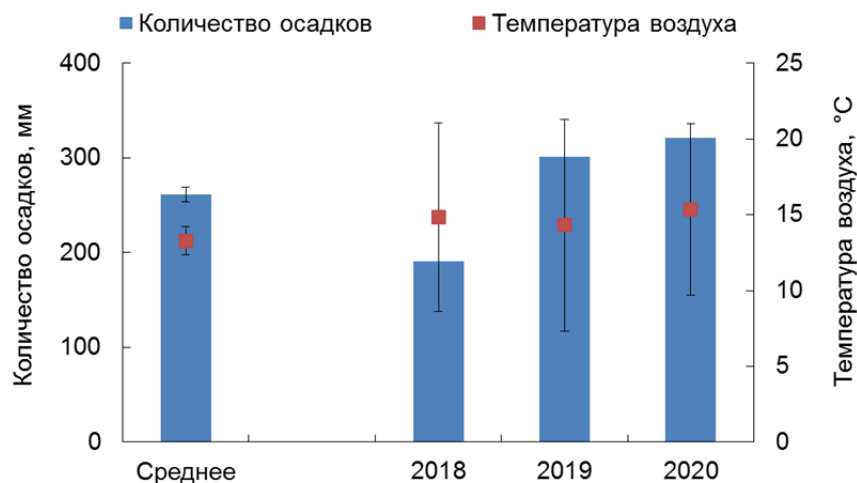


Рис. 2. Метеорологические параметры сезонов измерений

Данные приведены со стандартным отклонением. Источник – метеостанции Бор (61°36' с.ш. 90°00'1 в.д., <http://www.meteo.ru>), Ворогово (61°1'40" с.ш. 89°36'26" в.д., <https://rp5.ru>) и измерительный комплекс станции ZOTTO

Fig. 2. Meteorological characteristics of measurement seasons

Data are shown with standard deviation. The values calculated using the data for Bor (61°36'N 90°00'1E, <http://www.meteo.ru>), Vorogovo (61°1'40"N 89°36'26"E, <https://rp5.ru>) weather stations and measurement complex of ZOTTO station.

Характеристика участков

Sites descriptions

Участок	Координаты	Год (месяц)	Средняя температура почвы за сезон, °C (±SD)	Фитоценоз
Гряда	60°49,0621' с.ш. 89°23,3336' в.д.	2018 (авг., сент.)	11,9 ± 2,6	Сосново-кустарничково-сфагновый
		2019	16,6 ± 4,0	
		2020	16,0 ± 3,3	
Мочажина	60°49,0507' с.ш. 89°23,3682' в.д.	2018 (авг., сент.)	11,3 ± 2,6	Осоково-сфагновый
		2019	15,5 ± 2,7	
		2020	14,9 ± 2,9	

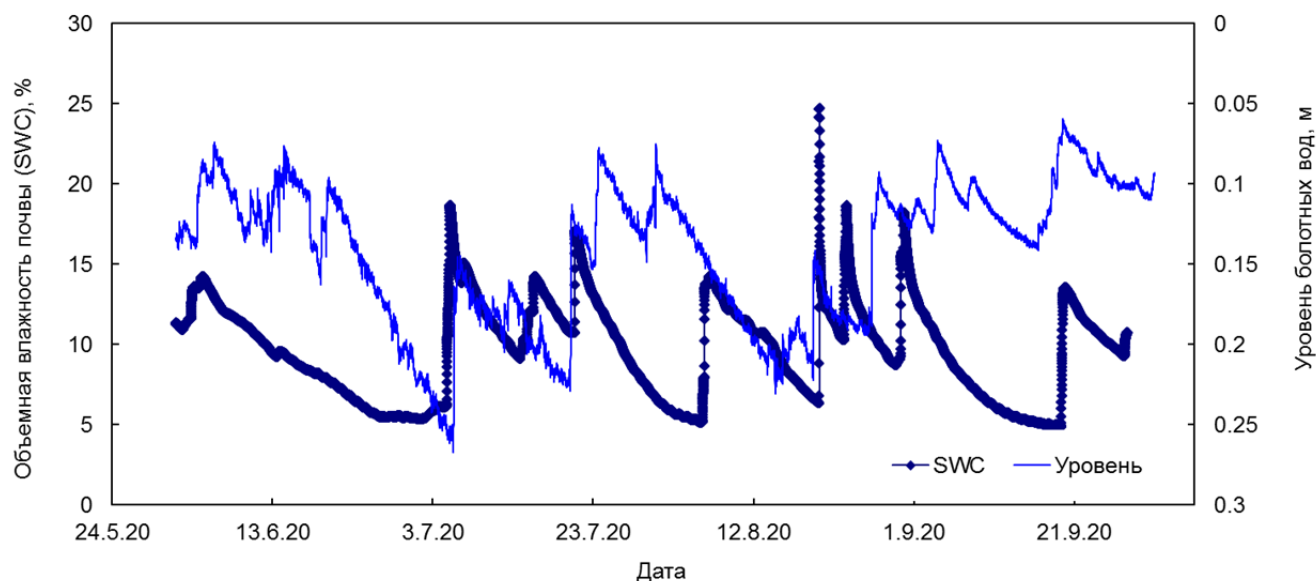


Рис. 3. Сезонные изменения влажности почв и уровня болотных вод в 2020 г.

Fig. 3. Seasonal changes in soil moisture and bog water level in the 2020

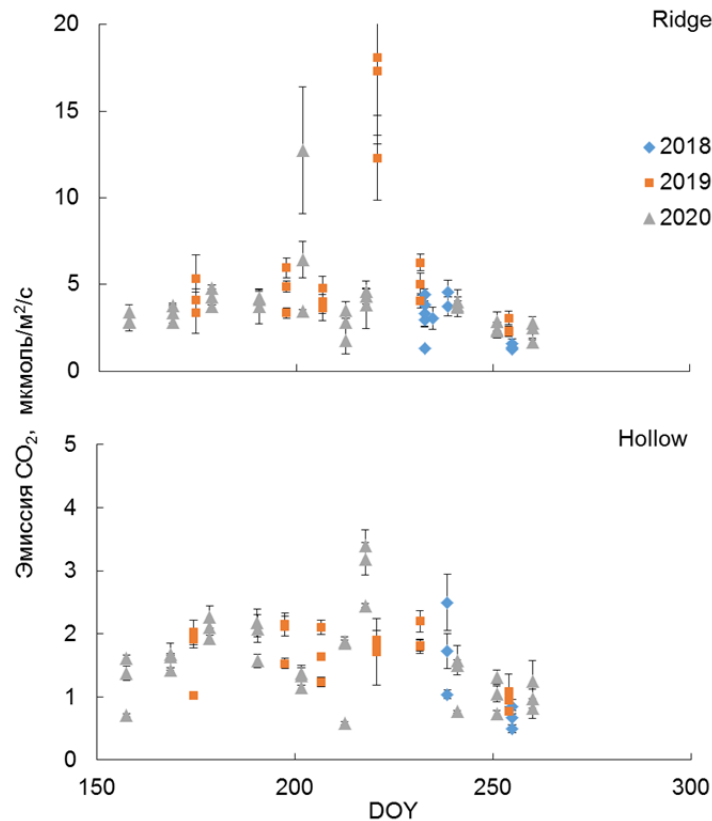


Рис. 4. Сезонная динамика эмиссии CO₂ с поверхности болотного массива – гряды (ridge) и мочажина (hollow) для измерений в 2018–2020 гг.

Fig. 4. Seasonal dynamics of CO₂ emission from the surface of the bog massif – ridge and hollow for measurements in 2018–2020

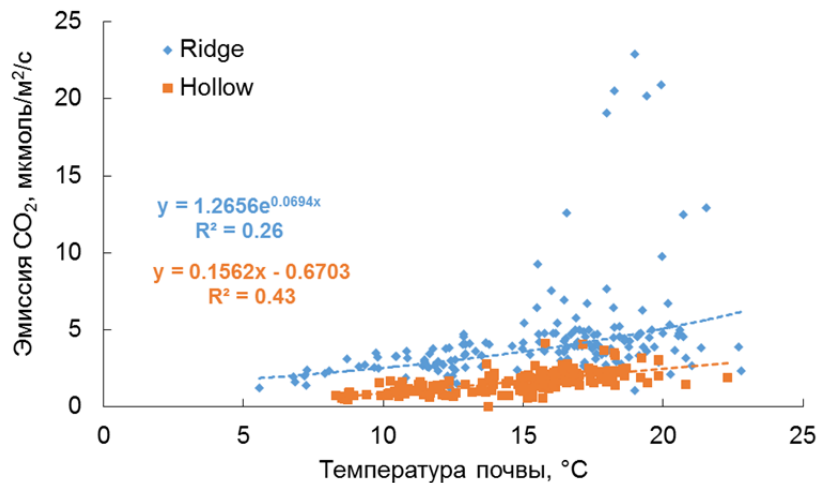


Рис. 5. Зависимость эмиссионного потока CO₂ от температуры почвы для всех измерительных сезонов (2018–2020) на участках гряды и мочажины

Fig. 5. Dependence of the CO₂ emission flux on the soil temperature for all measuring seasons (2018–2020) in the ridge and hollow sites

Обсуждение

Развитие и функционирование болотных экосистем является одним из наиболее обсуждаемых вопросов на сегодняшний день [Preston et al., 2012;

IPCC, 2013; Holmgren et al., 2015]. В ряде работ отмечалась существенная роль болот бореальной зоны северного полушария как одного из долгосрочных хранилищ углерода [Rewcastle et al., 2020]. Однако

на сегодняшний день ввиду изменения как естественных условий среды – рост температуры, учащение экстремальных сезонов по количеству осадков, так и системы землепользования, которая вносит основную неопределенность при расчете углеродного баланса [IPCC, 2013], болотные экосистемы подвергаются существенным изменениям.

Усиление процессов разложения органики как следствие роста температуры может привести к выделению дополнительного углерода в атмосферу [Gill et al., 2017]. Рассмотрению действия температурного фактора посвящен ряд работ [Birgham et al., 2006; Yu, 2012], в которых была выявлена четкая зависимость эмиссионного потока CO_2 с поверхности болота от температуры: эмиссия CO_2 экспоненциально увеличивалась с ростом температуры. Интересно, что в нашей работе такая тенденция четко прослеживается только для участка гряды (см. рис. 5). Причем это проявляется для всех изученных сезонов, в том числе для сезона 2018 г., в который наблюдался некоторый дефицит осадков (рис. 2). Отмеченные на участке мочажины зависимости показали, что связь с температурой на протяжении вегетационного сезона линейная и достаточно сильная ($r = 0,7$, $p \leq 0,05$). Различия в выборе функциональной зависимости двух переменных в данном случае связаны с различиями в микроклиматических условиях, о чем свидетельствуют и данные о температурном режиме и типе фитоценоза участков (см. таблицу). Экспоненциальная зависимость между температурой и эмиссией часто отмечается в лесных экосистемах [Raich, Schlesinger, 1992], которые так или иначе испытывают недостаток в доступной влаге и не находятся в обводненных условиях в течение всего летнего периода. В данном случае обнаружение линейной функциональной зависимости эмиссии CO_2 от температуры для участка мочажины может свидетельствовать, с одной стороны, об отсутствии других контролирующих факторов такой же силы воздействия, с другой – указывать на меньшую скорость изменения величины эмиссионного потока с ростом температуры именно для таких полностью обводненных условий обитания.

Что касается зависимости скорости эмиссионного потока от условий увлажнения, здесь также имеются некоторые специфические черты для рассмотренных типов участков. Изменения уровня болотных вод при этом можно использовать в качестве основной характеристики болотной экосистемы в течение вегетационного сезона. Было установлено, что для рассмотренных сезонов существенные изменения между уровнями воды в течение сезона отразились на величине потока CO_2 . Причем выделяется сезон 2019 г., когда изменение уровня болотных вод составило всего 15 см. При этом на участке гряды про-

изошел стремительный рост скорости эмиссии в середине сезона, однако на участке мочажины такой тенденции не было обнаружено. Ранее не отмечалось четкой зависимости между эмиссией CO_2 и условиями увлажнения [Preston et al., 2012; Muhr et al., 2016]. Однако проведенное нами исследование демонстрирует, что на участках гряд изменение уровня болотных вод в значительной степени определяет скорость эмиссии CO_2 .

В целом наши данные по скорости эмиссионного потока CO_2 с поверхности изученного болотного массива согласуются с оценками авторов по сходным территориям [Sheng et al., 2004; Наумов и др., 2007; Golovatskaya, Dyukarev, 2012; Yu, 2012]. Однако некоторые различия присутствуют. В нашей работе были обнаружены высокие различия между величиной эмиссии CO_2 с поверхности гряды и мочажины в сезон с малым изменением сезонного уровня болотных вод – 2019: эмиссия с участка гряды в среднем в четыре раза выше, чем с участка мочажины. Так, например, в работе А.В. Наумова и соавт. (2007) для среднетаежной подзоны поток CO_2 с поверхности гряды составил 3183 ± 271 , а с поверхности мочажины – 1706 ± 189 мг $\text{C}/\text{м}^2/\text{сут}$, что в среднем на 20 % отличается от полученных нами величин. Если рассмотреть Западную Сибирь, здесь следует отметить работу Е.А. Головацкой и соавт. [Golovatskaya, Dyukarev, 2012], где подчеркнута высокая роль температурного фактора в формировании эмиссионного потока CO_2 . Однако интересно, что потоки CO_2 в нашем регионе (Центральная Сибирь) существенно выше, чем оценки для болотных экосистем бореальной зоны Канады [Wang et al., 2020] и Финляндии [Lagomarsino, Elio, 2020]. Данный факт может быть обусловлен как микроклиматическими условиями конкретной экосистемы, так и наличием ряда других внешних лимитирующих факторов, помимо температуры и условий увлажнения, которые обуславливают величину потока CO_2 .

Заключение

Основываясь на результатах проведенного исследования, можно заключить, что эмиссионный поток с поверхности верхового болота в течение бесснежного периода зависит не только от условий увлажнения конкретного сезона, но и рассматриваемого участка болотного массива: эмиссия CO_2 из локальных повышений микрорельефа (гряд) значительно выше, чем с полностью обводненных участков (мочажин). Существенный отклик на условия увлажнения проявляется только в сезон с недостаточным количеством увлажнения и на повышенном участке болотного массива – гряде.

Скорость эмиссионного потока в течение вегетационного периода определяется в основном температурным режимом территории, а форма функциональной зависимости двух переменных – микроклиматическими параметрами участка болотного массива.

Установленные в ходе работы зависимости подтверждают высокую чувствительность болот Северного полушария и конкретно бореальной зоны к изменению внешних климатических факторов среды.

Полученные результаты будут использованы для дальнейшего рассмотрения развития болотного массива, а также моделирования эмиссионных потоков с его поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-44-243003.

ЛИТЕРАТУРА

- Глебов Ф.З. Болота и заболоченные леса лесной зоны Енисейского левобережья. М.: Наука, 1969. 131 с.
- Карпенко Л.В. Динамика растительного покрова, торфонакопления и углерода в Тугуланской котловине (средняя тайга Енисейского левобережья) // География и природные ресурсы. 1996. № 3. С. 74–81.
- Карпенко Л.В., Прокушкин А.С. Генезис и история послеледникового развития лесного болота в долине р. Дубчес // Сибирский лесной журнал. 2018. № 5. С. 33–44.
- Лесные экосистемы Енисейского меридиана / под ред. Ф.И. Плешикова. Новосибирск: Наука, 2002. 356 с.
- Наумов А.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2007. № 5. С. 771–779.
- Bridgham S.D., Megonigal J.P., Keller J.K., Bliss N.B., Trettin C. The carbon balance of North American wetlands // Wetlands. 2006. V. 26. P. 889–916.
- Bridgham S.D., Updegraff K., Pastor J. Carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization in northern wetlands // Ecology. 1998. V. 79. P. 1545–1561.
- Efremov S.P., Efremova T.T. Present stocks of peat and organic carbon in bog ecosystems of West Siberia // Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht, Netherlands: Utrecht Univ., 2001. P. 73–78.
- Freeman C., Ostle N., Kang H. An enzymic 'atch' on a global carbon store // Nature. 2001. V. 409. P. 149.
- Gill A.L., Giasson M.A., Yu R., Finzi A.C. Deep peat warming increases surface methane and carbon dioxide emissions in a black spruce-dominated ombrotrophic bog // Global Change Biol. 2017. V. 23. P. 5398–5411.
- Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. The influence of environmental factors on the CO₂ emission from the surface of oligotrophic peat soils in West Siberia // Eurasian Soil Science. 2012. V. 45 (6). P. 588–597.
- Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // Ecol. Appl. 1991. V. 1. P. 182–195.
- Holmgren M., Lin C.Y., Murillo J.E., Nieuwenhuis A., Penninkhof J., Sanders N., van Bart T., van Veen H., Vasander H., Vollebregt M.E., Limpens J. Positive shrubtree interactions facilitate woody encroachment in boreal peatlands // J. Ecol. 2015. V. 103. P. 58–66.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Annex I: Atlas of global and regional climate projections // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. P. 1311–1394.
- Lagomarsino A., Elio A. Agnelli Influence of vegetation cover and soil features on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in northern Finnish Lapland // Polar Science. 2020. V. 24. 100531.
- Le Quéré C., Andrew R.M., Canadell J.G., Sitch S., Korsbakken J.I., et al. Global carbon budget 2016 // Earth Syst. Sci. Data. 2016. V. 8. P. 605–649.
- McPartland M.Y., Kane E.S., Falkowski M.J., Kolka R., Turetsky M.R., Palik B., Montgomery R.A. The response of boreal peatland community composition and NDVI to hydrologic change, warming, and elevated carbon dioxide // Global Change Biol. 2019. V. 25. P. 93–107.
- Muhr J., Höhle J., Otieno D.O., Borken W. Manipulative lowering of the water table during summer does not affect CO₂ emissions and uptake in a fen in Germany // Ecol. Appl. 2016. V. 21 (2). P. 391–401.
- Preston M.D., Smemo K.A., McLaughlin J.W., Basiliko N. Peatland microbial communities and decomposition processes in the James Bay Lowlands, Canada // Front Microbiol. 2012. V. 3. P. 70.
- Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // Tellus B. 1992. V. 44 (2). P. 81–99.
- Rewcastle K.E., Moore J.A.M., Henning J.A., Mayes M.A., Patterson C.M., Wang G., Metcalfe D.B., classen A.T. Investigating drivers of microbial activity and respiration in a forested bog // Pedosphere. 2020. V. 30 (1). P. 135–145.
- 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 Biogeochemical Cycles. 2004. V. 18 (3). GB3004.
- Wang M., Wu J., Lafleur P.M., Luan J. Investigation of the climatological impacts of agricultural management and abandonment on a boreal bog in western Newfoundland, Canada // Science of the Total Environment. 2020. V. 711. 134632.
- Yu Z.C., Beilman D.W., Froliking S., MacDonald G.M., Roulet N.T., Camill P., Charman D.J. Peatlands and their role in the global carbon cycle // Eos. 2011. V. 92. pp. 97–98.
- Yu Z.C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 4071–4085.

Авторы:

Махныкина Анастасия Владимировна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет, научный сотрудник Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия.
E-mail: amakhnykina@sfu-kras.ru

Полосухина Дарья Александровна, инженер-исследователь, Сибирский федеральный университет; старший лаборант, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия.

E-mail: dana_polo@mail.ru

Колосов Роман Алексеевич, лаборант, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия.

E-mail: kolosov.phd@gmail.com

Прокушкин Анатолий Станиславович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН; доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

E-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru

Geosphere Research, 2021, 4, 85–93. DOI: 10.17223/25421379/21/7

A.V. Makhnykina^{1,2}, D.A. Polosukhina^{1,2}, R.A. Kolosov², A.S. Prokushkin^{1,2}

¹ *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

² *V.N. Sukachev Institute of forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

SEASONAL DYNAMICS OF CO₂ EMISSION FROM THE SURFACE OF THE RAISED BOG IN CENTRAL SIBERIA

The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 20-44-243003.

The bog ecosystems of the northern regions, with low productivity, can accumulate large amounts of carbon due to the low rate of decomposition and respiration. However, it is expected that climate change will lead to an intensification of assimilation and respiratory activity. In this work we considered the emission activity of a raised bog during the growing season. We also analyzed the main environmental factors that could have a significant impact on the CO₂ emission rates from the bog surface. In our study, we examined the seasonal dynamics of CO₂ emission from the surface of a raised bog (ryam). The study of soil emission was carried out for three seasons (2018–2020) on sections of the bog area of different heights – ridges and hollows. Soil emission measurements were performed using an LI-8100A infrared gas analyzer (Li-cor Inc., Lincoln, USA). Temperature measurements measured at three depths – 5, 10, and 15 cm from the surface using a Soil Temperature Probe Type E (Omega, USA). A Theta Probe Model ML moisture meter (Delta T Devices Ltd., UK) was used to measure the volumetric moisture (5 cm from the surface). The bog water level was measured during the entire frost-free period using the HOBO Water level logger U20L-04 (Onset, USA). In terms of the temperature regime of soils, the studied areas also differ significantly from each other, demonstrating the big discrepancies in the more humid seasons of 2019 and 2020. The difference in temperature in these seasons was about 1.0 °C, while in the 2018 season with insufficient moisture, the difference was two times less 0.5 °C. The maximum emission fluxes of CO₂ in the studied bog massif were recorded in the first half of August, and the lowest - from the middle of September. The highest emission rates were recorded in the 2019 season: CO₂ fluxes from the bog surface averaged $4.17 \pm 4.55 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ per season. For all observation seasons, CO₂ fluxes on ridges exceeded hollows by more than 60 % ($p \leq 0.05$). The strongest dependence was observed between the CO₂ emission rate and soil temperature, moreover, in the season with the amount of precipitation below the mean annual norm (<http://www.meteo.ru>) – 2018, the correlation is higher and the r-coefficient was 0.6 and 0.8 for the ridge and hollow sites, respectively ($p \leq 0.05$). The dependence of CO₂ emission on moisture conditions, on the contrary, is rather weak for two sites, and is often negative. Thus, based on the results obtained, it can be concluded that the emission flux from the surface of a raised bog during the snow-free period depends not only on the moisture conditions of a particular season, but also on the section of the bog area: the emission of CO₂ from local elevations of the microrelief - ridges is much higher than from more watered areas – hollows. A significant response to moisture conditions was found only for the season with insufficient moisture and in an elevated section of the bog area – ridge site. The CO₂ emission rate during the growing season is mainly determined by the temperature regime.

Key words: CO₂ emission, vegetation period, groundwater level, boreal zone, carbon cycle

References

- Glebov F.Z. *Bolota i zabolochennye lesa lesnoj zoni Yenisejskogo levoberej'ya* [Swamps and swampy forests of the forest zone of the Yenisei left bank]. Moscow: Nauka, 1969. 131 p. In Russian
- Karpenko L.V. *Dinamica rastitelnogo pokrova, torphonakopleniya i ugleroda v Tugulanskoy kotlovine (srednjay taiga Yenisejskogo levoberej'ya)* [Dynamics of vegetation cover, peat accumulation and carbon in the Tugulan depression (middle taiga of the Yenisei left bank)] // *Geography and natural resources*. 1996. No. 3. pp. 74–81. In Russian
- Karpenko L.V., Prokushkin A.S. *Genesis i isroria poslednikovogo razvitiya lesnogo bolota v doline reki Dubches* [Genesis and history of postglacial development of a forest bog in the valley of the Dubches river] // *Siberian Forest Journal*. 2018. No. 5. pp. 33–44. In Russian
- Lesnyye ekosistemy Eniseyskogo meridiana* [Forest ecosystems of the Yenisei meridian (research of the international geosphere-biosphere program)] ed F.I. Pleshikov. Novosibirsk: Nauka SB RAS, 2002. 356 p. In Russian
- Naumov A.V., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Parshina E.K. *Uglerodnij balance v bolotnich ecosystemach Zapadnoj Sibiri* [Carbon balance in bog ecosystems of Western Siberia] // *Siberian Journal of Ecology*. 2007. No. 5. pp. 771–779. In Russian
- Bridgham S.D., Megonigal J.P., Keller J.K., Bliss N.B., Trettin C. The carbon balance of North American wetlands // *Wetlands*. 2006. V. 26. pp. 889–916.
- Bridgham S.D., Updegraff K., Pastor J. Carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization in northern wetlands // *Ecology*. 1998. V. 79. pp. 1545–1561.
- Efremov S.P., Efremova T.T. Present stocks of peat and organic carbon in bog ecosystems of West Siberia // *Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands*. Utrecht, Netherlands: Utrecht Univ., 2001. pp. 73–78.
- Freeman C., Ostle N., Kang H. An enzymic 'atch' on a global carbon store // *Nature*. 2001. V. 409. pp. 149.

- Gill A.L., Giasson M.A., Yu R., Finzi A.C. Deep peat warming increases surface methane and carbon dioxide emissions in a black spruce-dominated ombrotrophic bog // *Global Change Biol.* 2017. V. 23. pp. 5398–5411.
- Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. The influence of environmental factors on the CO₂ emission from the surface of oligotrophic peat soils in West Siberia // *Eurasian Soil Science.* 2012. V. 45(6). pp. 588–597.
- Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol Appl.* 1991. V. 1. pp. 182–195.
- Holmgren M., Lin C.Y., Murillo J.E., Nieuwenhuis A., Penninkhof J., Sanders N., van Bart T., van Veen H., Vasander H., Vollebregt M.E., Limpens J. Positive shrubtree interactions facilitate woody encroachment in boreal peatlands // *J Ecol.* 2015. V. 103. pp. 58–66.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Annex I: Atlas of global and regional climate projections. In Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* // Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2013. pp. 1311–1394.
- Lagomarsino A., Elio A. Agnelli Influence of vegetation cover and soil features on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in northern Finnish Lapland // *Polar Science.* 2020. V. 24. 100531
- Le Quéré C., Andrew R.M., Canadell J.G., Sitch S., Korsbakken J.I., et al. Global carbon budget 2016 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2016. V. 8. pp. 605–649.
- McPartland M.Y., Kane E.S., Falkowski M.J., Kolka R., Turetsky M.R., Palik B., Montgomery R.A. The response of boreal peatland community composition and NDVI to hydrologic change, warming, and elevated carbon dioxide // *Global Change Biol.* 2019. V. 25. pp. 93–107.
- Muhr J., Höhle J., Otieno D.O., Borken W. Manipulative lowering of the water table during summer does not affect CO₂ emissions and uptake in a fen in Germany // *Ecol. Appl.* 2016. V. 21 (2). pp. 391–401.
- Preston M.D., Smemo K.A., McLaughlin J.W., Basiliko N. Peatland microbial communities and decomposition processes in the James Bay Lowlands, Canada // *Front Microbiol.* 2012. V. 3. pp. 70.
- Raich J.W., Schlesinger W.H. The global carbon-dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate // *Tellus B.* 1992. V. 44(2). pp. 81–99.
- Rewcastle K.E., Moore J.A.M., Henning J.A., Mayes M.A., Patterson C.M., Wang G., Metcalfe D.B., Klassen A.T. Investigating drivers of microbial activity and respiration in a forested bog // *Pedosphere.* 2020. V. 30(1). pp. 135–145.
- 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 Biogeochemical Cycles.* 2004. V. 18 (3). GB3004.
- Wang M., Wu J., Lafleur P.M., Luan J. Investigation of the climatological impacts of agricultural management and abandonment on a boreal bog in western Newfoundland, Canada // *Science of the Total Environment.* 2020. V. 711. 134632
- Yu Z.C., Beilman D.W., Frolking S., MacDonald G.M., Roulet N.T., Camill P., Charman D.J. Peatlands and their role in the global carbon cycle // *Eos.* 2011. V. 92. pp. 97–98.
- Yu Z.C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review // *Biogeosciences.* 2012. V. 9. pp. 4071–4085.

Author's:

Makhnykina Anastasia V., Cand. Sci. (Biology), Junior Researcher, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Researcher, V.N. Sukachev Institute of forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: amakhnykina@sfu-kras.ru

Polosukhina Daria A., Research Engineer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia; Laboratory Assistant, V.N. Sukachev Institute of forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: dana_polo@mail.ru

Kolosov Roman A., Laboratory Assistant, V.N. Sukachev Institute of forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: kolosov.phd@gmail.com

Prokushkin Anatoly S., Cand. Sci. (Biology), Head of Department, V.N. Sukachev Institute of forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia; Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

E-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru