

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.312.2

doi: 10.17223/25421379/24/7

ПОТОКИ УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМЕ ТОРФЯНО-БОЛОТНОГО КОМПЛЕКСА КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Мария Валерьевна Тимофеева¹, Ольга Юрьевна Гончарова²,
Георгий Валерьевич Матышак³, Станислав Витальевич Чуванов⁴



^{1, 4} Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия

^{2, 3} МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

¹ mtimofeeva02@gmail.com

² goncholgaj@gmail.com

³ matyshak@gmail.com

⁴ stas.chuvanov@gmail.com

Аннотация. Торфяники криолитозоны в условиях изменяющегося климата являются потенциальным источником соединений углерода, экспортируемого из них атмосферными и водными потоками, которые тесно связаны между собой. Для анализа потоков соединений углерода в системе почва – атмосфера – гидросфера были определены эмиссия и концентрация CO₂ и CH₄, концентрация растворимого органического углерода, параметры среды. Основным фактором, контролирующим потоки углерода и определяющим режимы функционирования почв в экосистемах торфяно-болотного комплекса Западной Сибири, выступает наличие и глубина залегания многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: эмиссия парниковых газов, растворенное органическое вещество, прерывистая криолитозона, криогенные почвы, торфяные почвы

Источник финансирования: Исследование выполнено в рамках государственного задания № 121040800321-4 («Индикаторы трансформации биогеохимических циклов биогенных элементов в природных и антропогенных экосистемах») и в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Для цитирования: Тимофеева М.В., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Чуванов С.В. Потоки углерода в экосистеме торфяно-болотного комплекса криолитозоны Западной Сибири // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 109–125. doi: 10.17223/25421379/24/7

Original article

doi: 10.17223/25421379/24/7

CARBON FLOWS ON THE WETLAND COMPLEX ECOSYSTEMS OF THE DISCONTINUOUS PERMAFROST ZONE OF WESTERN SIBERIA

Maria V. Timofeeva¹, Olga Y. Goncharova², Georgy V. Matyshak³, Stanislav V. Chuvanov⁴

^{1, 4} V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

^{2, 3} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

¹ mtimofeeva02@gmail.com

² goncholgaj@gmail.com

³ matyshak@gmail.com

⁴ stas.chuvanov@gmail.com

Abstract. Sensitive aquatic northern ecosystems containing peat soil with huge carbon pools are important components of the global carbon cycle. This deposit is a potential source of inorganic and organic carbon compounds exported from the peatlands by atmospheric and water flows, with a possible climate change. Atmospheric and water flows are closely related to each other. The quality and quantity of organic matter can alter CO₂ and CH₄ emission from peatlands because soil organic matter mineralization contributes to soil respiration. They have a large impact on the carbon dioxide concentration – the most powerful greenhouse

gas – in the atmosphere and, as a result, on the entire biogeochemical carbon cycle. In northern ecosystems with permafrost in the soil profile and because of its low sorption activity soil solution is the main connecting link between peatlands and water catchments. The study of their hydrochemistry is also important because it is the most sensitive indicator of transformations taking place in ecosystems; the chemical parameters of solutions react most quickly to all changes. The degradation of permafrost can affect both the value of exports and the composition of dissolved organic matter, while changing the hydrological regime, structure and functioning of associated ecosystems, as well as the landscapes of the territory. The aim of this study was to determine the regularities and factors of organic and inorganic carbon compounds redistribution in the ecosystems of the wetland complex (discontinuous permafrost zone of Western Siberia, Russia). There were measured CO_2 and CH_4 efflux and concentration, DOC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and WEOC ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ soil) content, environmental factors (vegetation cover, seasonal thawing, microrelief, temperature and water parameters).

The carbon dioxide emission in the wetland complex is characterized by high variability and has no significant differences between the *palsa* ($94 \pm 48 \text{ mg CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) and the *fen* ($85 \pm 25 \text{ mg CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). Inorganic carbon (CO_2) concentration is higher in peat soil solution compared to *fen* waters. Nevertheless, they both are a significant source of GHG to the atmosphere. The highest values are confined to the edge parts of *palsa* – it is “hot spots” of carbon exchange. As expected, there was a close interaction between CO_2 emission and concentration ($r = 0.802$ at $p = 0.05$; $n = 40$). There is also a correlation between the CO_2 concentration and environmental factors (soil temperature and moisture as well as the electric conductivity of water). Methane efflux is much less, it's $5.0 \pm 3.1 \text{ mg CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ on the *fen* and $0.4 \pm 0.1 \text{ mg CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ on the *palsa*. There are significant differences between two ecosystems.

Organic carbon compounds redistribution was estimated by the content of DOC&POC in soil solution and WEOC in soil extract. DOC concentration in the wetland complex waters in the range of $10\text{--}200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, POC concentration is less up to 100 times. Expectedly higher DOC values are characteristic of the *palsa*'s soil waters as opposed to the *fen* waters. POC values in two ecosystems do not differ statistically. This may be due to the fact that mineral part of soil profile is frozen, which excludes the adsorption of organic material by mineral particles. The WEOC content in the *palsa* varies from 380 to $1900 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ soil. The main factor controlling carbon fluxes and determining the soil functioning in ecosystems of the wetland complex of Western Siberia is the permafrost presence and depth of location.

Keywords: wetland complex, DOC, CO_2 emission, permafrost

Source of financing: This study was carried out within the framework of state assignment “Parameters of the transformation of biogeochemical cycles of biogenic elements in natural and anthropogenic ecosystems” and the Development Program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Lomonosov Moscow State University “The future of the planet and global environmental changes”.

For citation: Timofeeva M.V., Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Chuvanov S.V. (2022) Carbon flows on the wetland complex ecosystems of the discontinuous permafrost zone of Western Siberia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 109–125. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/24/7

Введение

Криогенные торфяные почвы являются значимыми наземными пулами углерода на планете – в их метровой толще сохранено порядка 50 % от общего почвенного органического углерода (порядка 280 Pg углерода) [Tarnocai et al., 2009]. В условиях изменяющегося климата этот депозит – потенциальный источник неорганических и органических соединений углерода, экспортируемого из торфяников атмосферными и водными потоками [Freeman et al., 2001; Evans, Monteith, Cooper, 2005; Limpens et al., 2008; Fenner, Freeman, 2011], которые тесно связаны между собой [Sobek et al., 2003; Moore, Paré, Boutin, 2008; Pagano, Bida, Kenny, 2014]. В северных широтах, в условиях близкого залегания многолетнемерзлых пород (ММП) и низкой сорбционной активности маломощного деятельного слоя, основным связующим звеном между торфяниками и крупными водосборами являются почвенные (в том числе надмерзлотные) воды. Изучение гидрохимии водных потоков важно еще и потому, что это наиболее чув-

ствительный индикатор происходящих в экосистемах преобразований – химические параметры растворов наиболее быстро реагируют на все изменения. Дegradaция ММП может повлиять как на величины экспорта, так и на состав растворенного органического вещества, при этом изменяются гидрологический режим, структура и функционирование сопряженных экосистем, а также ландшафты территории [Olefeldt, Roulet, 2012; Матвеева, 2017]. Количество и качество органического вещества могут также изменить эмиссию CO_2 и CH_4 из торфяников, поскольку минерализация водорастворимого органического вещества (РОВ) вносит свой вклад в дыхание почв. В результате баланс углерода изменяется не только в сопряженных водных экосистемах [Fellman et al., 2008], но и на площади всего водосбора [Karlsson et al., 2010].

Растворимые органические вещества почвенных растворов и природных вод представляют собой сложную смесь ароматических и алифатических богатых углеродом соединений, среди которых преобладают высокомолекулярные вещества – гумусовые

кислоты; но присутствуют и соединения с низкой молекулярной массой – органические кислоты, пептиды, моносахариды и дисахариды, аминсахара [Zsolnay, 1996]. Растворимые органические вещества играют важную роль в функционировании наземных экосистем: оказывают влияние на формирование химического состава почв и их развитие [Lofts et al., 2001; Kaizer et al., 2001], тесно связаны с транспортом питательных элементов, металлов и органических загрязнителей [Schnitzer, Khan, 1972; Christ, David, 1996; Michalzik, Matzner, 1999], выступают субстратом для почвенной микрофлоры [McDowell, Likens, 1988] и растительности [Nasholm et al., 1998]. Рядом работ показано влияние POB на биологическую активность почв [Xu, Juma, 1993; Flessa et al., 2000], выветривание минералов [Raulund-Rasmussen et al., 1998] и некоторые почвенные процессы [Dawson et al., 1978; Neff, Asner, 2001].

Неорганический растворенный углерод в пресных водах представлен метаном (CH_4) и диоксидом углерода (CO_2), а также разными сочетаниями ионов HCO_3^- , CO_3^{2-} . Основными процессами, обеспечивающими поступление в водотоки соединений растворенного неорганического углерода и определяющими его концентрацию, являются: 1) дыхание почвы, приводящее к насыщению грунтовых вод CO_2 ; 2) дыхание водных организмов, протекающее как в воде, так и в илах и донных отложениях, с которыми соприкасается вода; 3) деструкция органических остатков непосредственно в водотоках; 4) растворение карбонатов и выветривание силикатных минералов в почвах и почвообразующих породах; 5) газообмен между водной средой и атмосферой [Stumm, Morgan, 1981; Wetzel, 1983; Wetzel, Likens, 1991]. Уменьшение концентрации двуокиси углерода в воде происходит в процессе фотосинтеза (когда диоксид углерода поглощается водными растениями), а также в результате выделения его в атмосферу (дегазация). Вклад различных источников зависит от индивидуальных характеристик водосбора: геологии коренных пород, свойств почвы, топографии местности, гидрологической сети, геокриологических условий и т.д. [Hope, Billet, Cresser, 1994; Jones, Mulholland, 1998]. Проточные и застойные природные воды с низким pH и слабой ионной силой пере-сыщаются двуокисью углерода и характеризуются высоким парциальным давлением этого газа – более высоким по сравнению с атмосферным. По этой причине значительные потоки углерода в составе CO_2 поступают из водного бассейна в атмосферу, т.е. поверхностные воды могут выступать источником углекислого газа. Часть растворенного CO_2 транспортируется водотоками в ручьях и реках вниз по течению и в итоге собирается в замкнутых пониженных участках

(водосборах) [Hope et al., 2004], обеспечивая таким образом непрерывный круговорот потока углерода, полученного на суше, в океаны и обратно в атмосферу [Kling, Kipphut, Miller, 1991; Hope, Billet, Cresser, 1994].

Количественная и качественная оценка углеродных соединений в системе литосфера – атмосфера – гидросфера необходима для выявления последствий потепления климата в северных экосистемах. Детальная оценка закономерностей и ведущих факторов перераспределения соединений углерода водными потоками в экосистемах криолитозоны, в области распространения прерывистой и островной мерзлоты не проводилась. В связи с этим цель работы – выявить закономерности и факторы перераспределения органических и неорганических соединений углерода в экосистеме торфяно-болотного комплекса криолитозоны Западной Сибири.

Объекты и методы

Район исследования расположен в криолитозоне, в области прерывистого распространения ММП на северной границе северной тайги. Рельеф полого-волнистый, приурочен к III озерно-аллювиальной равнине (отн. высота 25–35 м), которая находится в междуречье рек Лев. Хетга и Хейгияха (Надымский район, Тюменская область, ЯНАО). Расчлененные части равнины, приуроченные к берегам рек, залесены, а центральные нерасчлененные ее части характеризуются высокой заболоченностью и заозеренностью [Васильевская, Иванов, Богатырев, 1986]. Характеризуется район суровыми климатическими условиями: продолжительный зимний период (7–8 мес.), отрицательная среднегодовая температура воздуха (-5°C), количество осадков варьирует от 450 до 650 мм/год. Ландшафты территории представлены двумя основными типами, которые различаются между собой по присутствию ММП и степени гидроморфизма. Автоморфные лесные ландшафты, представленные северной тайгой, характеризуются отсутствием ММП в настоящее время. На формирование ландшафтов лесотундры, которые представлены олиготрофными болотами и бугристыми торфяниками, оказывают влияние ММП, залегающие на глубине 1–2 м [Москаленко, 2012].

В качестве ключевого объекта исследования был выбран торфяно-болотный комплекс, представляющий собой комбинацию плоскобугристых торфяников и сопряженных заболоченных ложбин стока. Изучаемые торфяники характеризуются плоской и слабонаклонной крупнокочковатой поверхностью и приподняты над общим уровнем верховых болот на 0,5–5,0 м [Матышак и др., 2017], благодаря чему плоскобугристый торфяник развивается в полугид-

роморфных, а местами и в автоморфных условиях. Почвенный покров плоскобугристых торфяников отличается высокой комплексностью. В целом почвенный профиль здесь сложен 1–2 органогенными горизонтами (различного ботанического состава и степени разложения) общей мощностью 40–60 см и подстиляется минеральной составляющей. Минеральные горизонты представлены песчаным, реже суглинистым материалом, который сменяется мерзлыми породами того же состава. Наиболее типичные для изученных торфяников почвы (по КиДПР-2004) – торфяная олиготрофная мерзлотная (ТО–ТТ $\perp$), торфяно-криозем (Т–CR–C $\perp$) и торфяно-глеезем (Т–G–CG $\perp$). Многолетние мерзлотные породы в пределах 0,5–1 м и представлены высокольдистыми отложениями песчано-супесчаного состава. В растительном покрове торфяников доминируют *Betula nana* L., *Rubus chamaemorus* L., *Ledum palustre* L., *Vaccinium uliginosum* L. Для напочвенного яруса характерны лишайники рода *Cladonia* (*Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F.H. Wigg., *Cladonia stellaris* (Opiz.) Pouz. et Vezda., *Cladonia sylvatica* L.) и мхи рода *Sphagnum*; а для травяного – представители сем. Сурегасеae. Ложбины стока между буграми представлены верховым олиготрофным болотом, имеют вытянутую форму и соединены между собой в единую сеть. В этих ландшафтах основными почвообразующими процессами являются заболачивание и торфонакопление, что определяет

развитие здесь органогенных типов почв: преобладают торфяные олиготрофные почвы, местами встречаются торфяные эутрофные. Многолетнемерзлые породы залегают глубже 2 м. Растительность представлена сфагновыми мхами и олиго- и мезотрофными гидрофитами.

Полевые исследования и отбор образцов почвы и воды для лабораторных исследований проводили в августе (пик вегетационного сезона) 2018 г. Точки опробования были заложены так, чтобы охватить всю площадь изучаемого торфяника (рис. 1), располагались они на однотипной лишайниковой растительности на выровненных участках между кочками, чтобы исключить влияние микрорельефа. Для определения микрорельефа и растительности было заложено три трансекты (указаны красным цветом) в разных направлениях ($n = 45$), а для определения параметров функционирования экосистем (эмиссия и концентрация парниковых газов; температура и влажность почвы; pH, электропроводность (ЕС) и окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) болотных вод) точки закладывали по трем кругам, условно маркирующим центральную, среднюю и краевую часть торфяника, еще один круг был заложен на болоте ($n = 10$ для каждого круга). Дополнительно закладывали трансекты длиной до 80 м (черным цветом) на ложбинах стока в направлениях от торфяника.

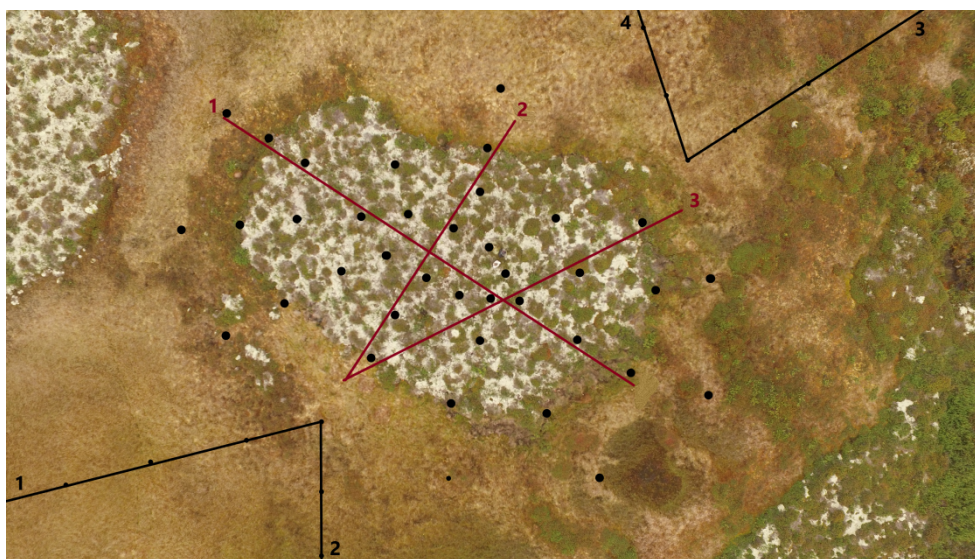


Рис. 1. Расположение точек опробования на изучаемом торфяно-болотном комплексе

Fig. 1. The sampling points location of the studied bog complex

1. Определение проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса (ТКЯ) и мохово-лишайни-

кового покрова (МЛП) проводили с использованием квадрата-сетки – метровой квадратной рамки, разде-

ленной на 100 одинаковых ячеек площадью 100 см² каждая.

2. Микрорельеф определяли на основе относительных высот, за 0 была принята точка с наименьшим превышением.

3. Эмиссию CO₂ и CH₄ почвами торфяника и болота измеряли однократно в каждой точке в дневное время суток (11:00–14:00) методом статичных закрытых камер [Смагин, 2005]. Перед установкой камер для исключения дополнительного потока CO₂ за счет дыхания фитоценоза удаляли растительность. Контроль температуры воздуха во время измерений осуществляли с помощью электронных термометров TP3001 (разрешение 0,1 °C, точность ±1 °C).

4. Концентрацию CO₂ в почвенном воздухе определяли методом мембранных пробоотборников [Смагин, 2005]. В почву на 5–10 см выше стола мерзлоты были помещены трубки диаметром 1 см, герметично закрытые с поверхности резиновой пробкой.

5. В каждой точке опробования в трехкратной повторности измеряли температуру почвы на глубине 10 см с помощью термощупа TP3001 (разрешение 0,1 °C, точность ±1 °C) и объемную влажность в верхнем 20-сантиметровом слое почвы с помощью влагомера Spectrum TDR (разрешение 1 %, точность ±3 %). Точки подбирали так, чтобы они были расположены достаточно близко от места установки камер для определения эмиссии парниковых газов, но не нарушали при этом нативное состояние почвенного покрова.

6. Измерение мощности сезонно-талого слоя (СТС) проводили зондированием мерзлотным щупом (ГОСТ 26262-2014, 2015), который представляет собой заостренный стержень, сделанный из металла. Длина щупа – 2 м, диаметр – 10 мм.

7. Определение содержания растворенного диоксида углерода в болотных водах проводили методом headspace equilibration [Hope, Billet, Cresser, 1994]. Дальнейший расчет концентрации (моль/л) и парциального давления CO₂ (µatm) проводился с учетом объемов жидкой и газообразной фазы в пробоотборнике, температуры воды и pH [Halbedel, 2018]. Измерения концентрации CO₂ в пробах проводили на портативном газоанализаторе с инфракрасным датчиком RMT DX6210 (разрешение 0,001 %, точность 0,002 %). Для оценки концентрации CH₄ пробы отбирали в герметичные емкости с солевым раствором и определяли на газовом хроматографе Кристаллюкс 4000М (чувствительность 10⁻⁵ %, точность 2 %). Для оценки торфяно-болотного комплекса как потенциального источника газов в атмосферу, измерены концентрации накопленного в почве и в воде CO₂. Концентрацию CO₂ в почвенных надмерзлотных водах оценивали с использованием данных по кон-

центрации CO₂ в почвенном воздухе (метод мембранных пробоотборников), находящемся в равновесии с надмерзлотными водами. В соответствии с законом Генри–Дальтона при температуре воды около 0 °C и pH = 4 концентрация CO₂ в воде будет приблизительно в 1,6 раз больше, чем в почвенном воздухе [Смагин, 2005]. На основе этого мы считаем, что данные по концентрации CO₂ в надмерзлотных водах торфяника и поверхностных водах болота сопоставимы и могут быть использованы для сравнения друг с другом. Соответственно, мы получили три типа данных: концентрация CO₂ в болотных водах (моль/л), концентрация CO₂ в почвенном воздухе надмерзлотного горизонта почв торфяника (ppm), а также расчетная концентрация CO₂ в надмерзлотных водах торфяника (ppm).

8. Определение физико-химических свойств воды (pH, ЕС, ОВП) проводили с помощью портативных полевых измерителей серии HANNA Instruments (погрешность приборов составляет ± 0,1 ед. pH, ± 2% мкСм, ±2 mV для pH-метра, кондуктометра и вольтметра соответственно).

9. Произведен отбор образцов почвы и воды. В точках с возможностью отбора свободной воды отбирали непосредственно воду. В точках, где такой возможности не было ввиду недостаточного увлажнения, для сбора свободной воды под небольшим прессом отжимали ее из почвенных пор [Раудина и др., 2016]. До проведения лабораторных анализ образцы хранили при естественной влажности и температуре 4 °C.

Лабораторный анализ отобранных образцов был проведен с использованием стандартных аналитических методов.

1. Определение влажности почвенных образцов проводили на анализаторе влажности MB35 (погрешность ±0,3 %).

2. Анализ водноэкстрагируемого органического углерода (ВОУ) в водной вытяжке (1 : 25) [Теория и практика..., 2006], а также общего органического углерода (Сорг) и водорастворимого органического углерода (РОУ) в природных водах проводили методом каталитического сжигания на автоматическом анализаторе TOC – V_{CPN} (Shimadzu, Japan). Ввиду высокого содержания в пробах грубодисперсного материала, для определения Сорг образцы отфильтровывали через крупнопористые фильтры «белая лента» (5–8 µm). Растворимый органический углерод определяли в водах, пропущенных через ацетатцеллюлозный мембранный фильтр (0,45 µm) [Zsolnay, 1996].

3. В образцах определение дисперсного органического углерода (ДОУ) проводили расчётным методом по разности Сорг и РОУ.

Статистический анализ полученных данных проводился в программном пакете Statistica 10.0 с помощью методов параметрической и непараметрической статистики. Данные проверяли на нормальность, используя критерии Колмогорова–Смирнова, Лиллиефорса и Шапиро–Уилка, в случае, когда данные проходили проверку по всем критериям, выборку считали нормально распределенной. Для сравнения выборок использованы параметрический критерий Стьюдента (t-критерий) и непараметрический критерий Краскела–Уоллиса. Для выявления связи между физико-химическими свойствами и параметрами функционирования использовали корреляционный анализ с включением коэффициента корреляции Спирмена. Выбранный уровень значимости $\alpha = 0,05$. Построение картограмм для выявления пространственного распределения параметров исследования проводили в пакете GoldenSoftwareSurfer 8.

Результаты

Экологические факторы в пределах торфяно-болотного комплекса. Мохово-лишайниковый покров характерен для всей изученной площади, его проективное покрытие в среднем на торфянике составляло $91 \pm 17\%$. ТКЯ в разных точках занимал от 0 до 90 % поверхности, для него характерна крайне высокая вариабельность (коэффициент вариации

77 %). Относительное превышение, отражающее микрорельеф поверхности, в среднем составляло $0,57 \pm 0,24$ м (коэффициент вариации 42 %). Выявлено, что северная и северо-восточная части торфяника имеют более крутой уклон поверхности по сравнению с южным склоном, характеризующимся более пологим спуском. Мощность СТС в пределах торфяника на 11 августа 2018 г. варьировала от 0,3 до 0,5 м. Стол мерзлоты имеет выраженный рельеф (рис. 2). В средней части торфяника СТС имеет наименьшую мощность (тест Тьюки, $p < 0,005$), на болоте ММП не фиксировались двухметровым щупом. Температура почвы в дневное время на глубине 10 см на торфянике примерно в три раза меньше температуры воды в болоте. Выявлена слабая, но значимая связь ($r = 0,373$ при $p = 0,05$; $n = 30$) между глубиной СТС и температурой почвы. Влажность в верхнем 20-сантиметровом слое почвы на торфянике варьирует в пределах 21,8–58,0 % и значительно отличается ($p = 0,0000$) от таковой в почвах олиготрофного болота, где влажность более стабильна и существенно выше.

Воды олиготрофного болота характеризуются относительно стабильной величиной pH (3,6–4,2), слабой минерализованностью, о чем говорит низкая солевая нагрузка (ЕС не превышает 65 мкСм/см), а также окислительными условиями с ОВП более +220 мВ (табл. 1).

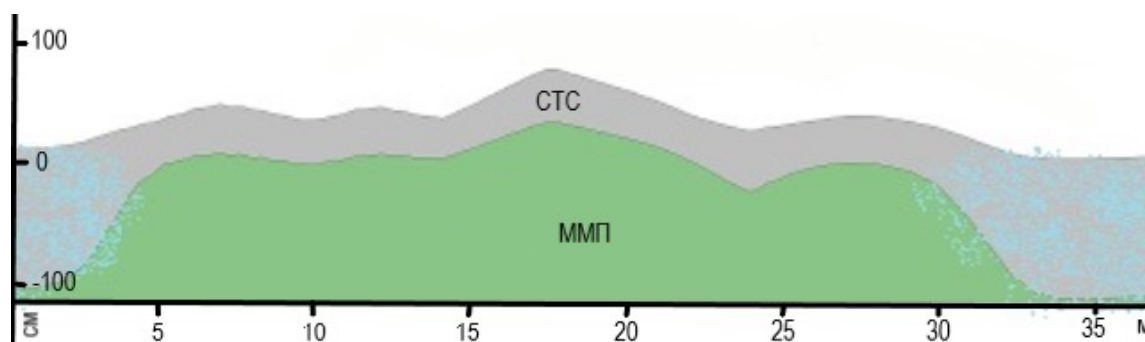


Рис. 2. Поперечный профиль торфяника, отражающий рельеф залегания ММП

Fig. 2. The profile of the permafrost relief

Таблица 1

Физические и химические свойства почв и вод болотно-торфяного комплекса

Table 1

Physical and chemical properties of soils and waters of the bog complex

Экосистема	СТС, м	t почвы/воды, °C	W почвы, %	pH	ЕС, мкСм/см	ОВП, мВ
Плоскобугристый торфяник	$0,40 \pm 0,06$ (21%)	$4,4 \pm 1,2$ (28%)	$47,2 \pm 2,1$ (16%)	–	–	–
Олиготрофное болото	–	$13,0 \pm 1,4$ (11%)	$60,6 \pm 0,3$ (2%)	$3,9 \pm 0,1$ (6%)	57 ± 18 (18%)	337 ± 17 (5%)

Примечание. Указаны средние значения $\pm$ стандартные отклонения (коэффициент вариации), $n = 30$ и 26 для торфяника и болота соответственно.

Note. Mean values $\pm$ standard deviations (coefficient of variation) are indicated, $n = 30$ and 26 for palssa and bog, respectively.

Характеристика неорганических соединений углерода. Эмиссия CO_2 почвами торфяника и олиготрофного болота составила 94 ± 48 и 85 ± 25 $\text{mg CO}_2/\text{m}^2/\text{час}$ соответственно (рис. 3). Данный показатель характеризуется высокой пространственной вариабельностью (коэффициенты вариации 51 и 30 % для торфяника и болота соответственно). Распределение значений эмиссии CO_2 подчиняется закону нормального распределения. Значимых различий по этому параметру в пределах торфяника (в разных его частях) не выявлено, отсутствуют различия и между двумя экосистемами. Корреляционный анализ не дал статистически значимых результатов связи между эмиссией и другими показателями.

Эмиссия метана почвами торфяника не превышает $0,8$ $\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$ ($n = 4$), на болоте значения выше на порядок – до $9,0$ $\text{mg CH}_4/\text{m}^2/\text{ч}$ ($n = 2$). Хочется отметить, что измерения метана на торфянике были единичны в силу того, что, во-первых, поток этого газа почвами торфяника мал по сравнению с потоком диоксида углерода. Во-вторых, измерения эмиссии почвами болота сопряжены с методическими сложностями, вызванными отбором, хранением и транспортировкой проб.

В силу того, что величина эмиссии не полностью отражает биологическую активность почв, так как зависит не только от биотических, но и абиотических факторов, для более детальной оценки соединений неорганического углерода проведены измере-

ния концентрации диоксида углерода в почвенном воздухе и в воде экосистем торфяно-болотного комплекса (табл. 2). Данный показатель характеризуется высокой пространственной вариабельностью. Значения концентрации CO_2 не подчиняются закону нормального распределения. В пределах торфяника установлены достоверные различия концентрации CO_2 в почвенном воздухе – максимальные величины характерны для краевой части торфяника. Локально имеются точки с экстремально высокими значениями (до 20 тыс. ppm), приуроченные к местам наибольшего сезонного протаивания ($r = 0,537$ при $p = 0,05$; $n = 30$).

На болоте также наблюдаются точки с повышенной концентрацией CO_2 в воде. В целом по мере удаления от торфяника концентрация CO_2 в болотной воде снижается (рис. 4). Однако по трансектам не всегда удается однозначно это проследить в силу того, что в конце трансект часто сказывается присутствие соседних торфяников, входящих в торфяно-болотный комплекс. Установлено, что изученные болотные воды в августе характеризуются парциальным давлением CO_2 более 350 μatm .

Концентрация метана в почвенном воздухе и поверхностных водах торфяно-болотного комплекса чрезвычайно мала и не превышает 0,05 %. Значимых отличий в концентрации неорганических соединений углерода в болотных и надмерзлотных водах торфяника не выявлено.

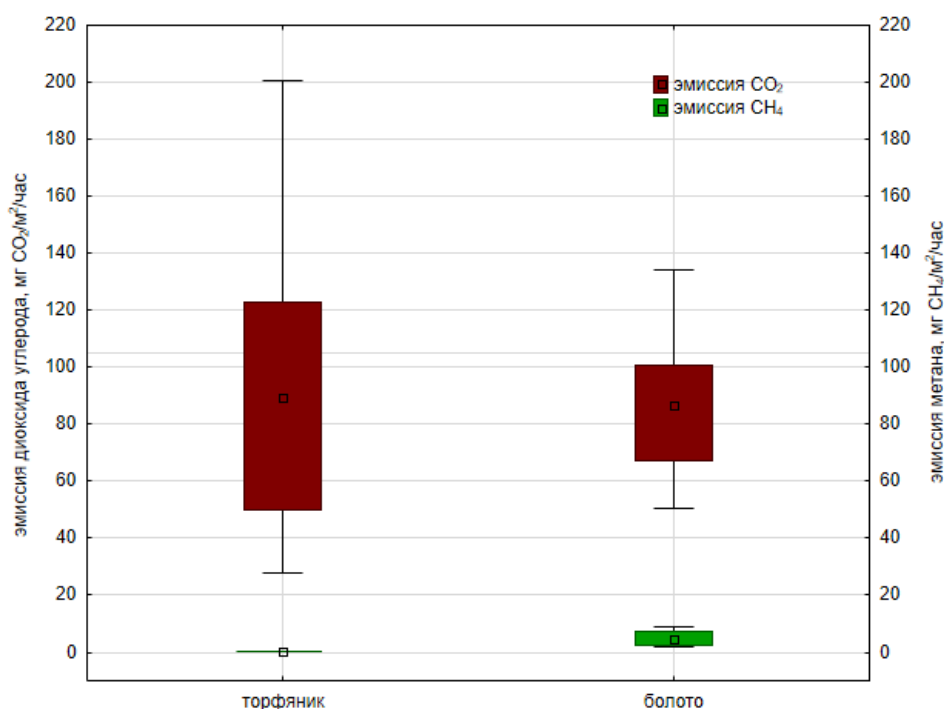


Рис. 3. Эмиссия диоксида углерода и метана почвами торфяно-болотного комплекса

Fig. 3. The carbon dioxide and methane efflux by the soils of the peat-bog complex

Таблица 2

Описательная статистика концентрации CO₂ в экосистемах торфяно-болотного комплекса

Table 2

The descriptive statistics of the inorganic carbon compounds content and fluxes in the peat-bog complex ecosystems

Показатель	N	Среднее	Ст. откл.	Нижний квартиль	Медиана	Верхний квартиль	Экссесс	Ст. ошибка экссесса	Коэффициент вариации
Плоскобугристый торфяник									
Концентрация CO ₂ в почвенном воздухе, ppm	30	6 010	4 178	3 210	4 600	7 200	1,98	0,43	70
Концентрация CO ₂ в почвенных надмерзлотных водах, ppm	30	10 010	6 960	5 347	7 662	11 993	1,98	0,43	70
Олиготрофное болото									
Концентрация CO ₂ в болотных водах, мкмоль/л	26	337	225	183	274	379	1,52	0,47	67
Парциальное давление CO ₂ , atm	26	8 916	5 207	4 579	8 227	10 523	0,95	0,43	58

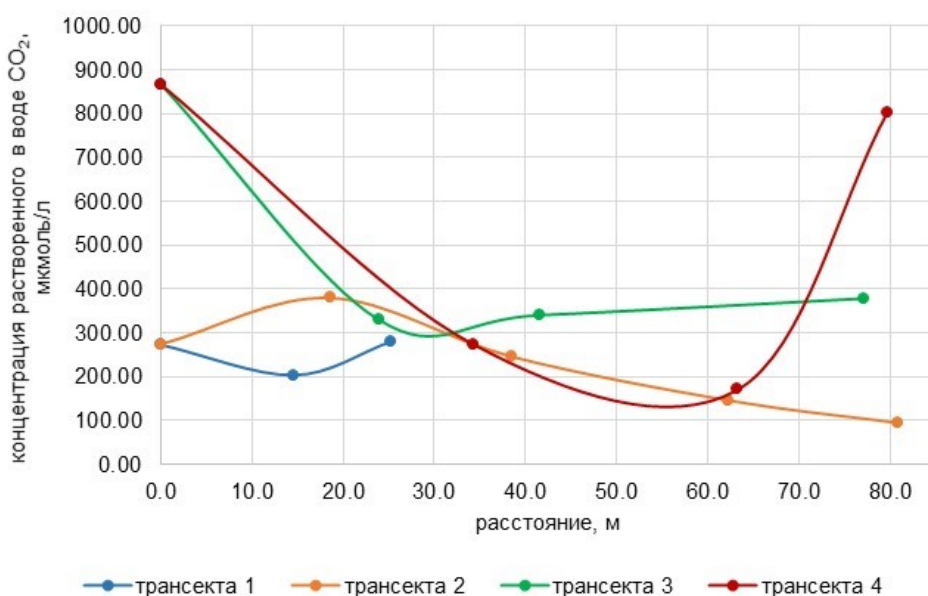


Рис. 4. Изменение концентрации CO₂ в болотных водах по мере удаления от торфяника

Fig. 4. Change in CO₂ concentration in the fen water with distance from the palsa

В целом в пределах изученного торфяно-болотного комплекса с помощью корреляционного анализа выявлена связь концентрации CO₂ с факторами среды: температурой ($r = 0,396$ при $p = 0,003$; $n = 55$) и влажностью ($r = 0,315$ при $p = 0,048$; $n = 40$) почвы, а также с величиной ЕС воды ($r = 0,419$ при $p = 0,037$; $n = 25$). Закономерно выявлена прямая тесная связь между эмиссией и концентрацией CO₂ ($r = 0,802$ при $p = 0,05$; $n = 40$).

Характеристика органических соединений углерода. Концентрация РОУ в надмерзлотных водах

торфяника и болотных водах в целом варьирует от нескольких десятков до более чем 200 мг/л, содержание ДОУ ниже на 1–2 порядка (рис. 5). Участки торфяника по содержанию РОУ и ДОУ достоверно не отличаются. Закономерно более высокие значения РОУ в торфяно-болотном комплексе характерны для почвенных надмерзлотных вод ($p = 0,000035$) по сравнению с болотными. По ДОУ надмерзлотные воды торфяника и болотные воды не отличаются.

Содержание водноэкстрагируемого органического углерода на торфянике варьирует от 380 до

1 900 мг/г почвы (коэффициент вариации 45 %) и в среднем составляет 800 мг/г почвы. Различий в содержании БОУ на разных участках торфяника не выявлено. Корреляционный анализ не выявил

достоверных связей содержания органического углерода (разных фракций) с параметрами функционирования среды (температура, уровень СТС, ОВП, pH и др.).

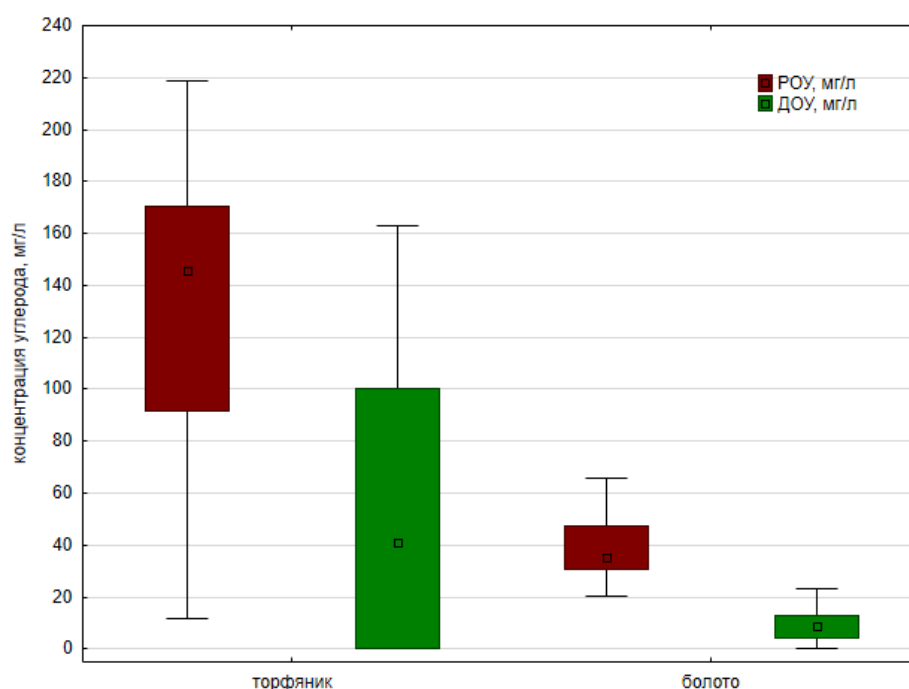


Рис. 5. Концентрация фракций органического углерода в водах экосистем торфяно-болотного комплекса

Fig. 5. Concentration of organic carbon compounds in the wetland complex ecosystems waters

Обсуждение

Олиготрофное болото и плоскобугристый торфяник представляют собой две контрастные экосистемы и значительно отличаются по изученным свойствам и параметрам функционирования. Основным фактором, создающим контрастность условий, выступает наличие и глубина залегания ММП в толще почвенного профиля торфяника, где СТС не превышает 0,5 м и определяет режимы функционирования почв. По полученным данным, эта неоднородность условий выражается в крайне высокой вариабельности микрорельефа, растительности, температуры и влажности почв. В ложбинах стока, представленных олиготрофным болотом, ММП отсутствуют (или залегают на глубине более 2 м) и не оказывают прямого влияния на функционирование экосистемы в настоящее время [Матышак и др., 2017], в связи с чем контрастность условий на них выражена слабее.

Содержание неорганических соединений углерода и их связь с факторами среды. Установлено, что эмиссия диоксида углерода в августе в изученных экосистемах в целом невысокая. Полученные значе-

ния эмиссии CO_2 свидетельствуют о низкой биологической активности в изученных экосистемах [Наумов, 2009; Курганова, 2010] несмотря на то, что исследования проводились в пик вегетационного сезона. Указанные величины по эмиссии и концентрации CO_2 сравнимы с таковыми, полученными на данной территории [Бобрик, 2016; Гончарова и др., 2016; Бобрик и др., 2018] и на схожих объектах Западной Сибири [Наумов, 2011; Головацкая, Дюкаев, 2012]. В целом для олиготрофного болота характерен сложный характер функционирования и множество связанных друг с другом и оказывающих взаимное влияние факторов, что в свою очередь вносит вклад в интерпретацию полученных результатов [Бобрик, 2016].

В работе по схожим объектам было сделано предположение [Гончарова и др., 2019], что не весь продуцируемый почвами газ выделяется с поверхности, возможны его потери за счет грунтового стока. В краевых частях изученного нами торфяника имеются точки с экстремально высокими значениями эмиссии и концентрации CO_2 (рис. 6), что косвенно подтверждает высказанное предположение. Нижние

горизонты торфяника характеризуются близкими к нулю температурами [Goncharova et al., 2015], из-за чего возможно интенсивное растворение газа в холодных почвенных надмерзлотных водах [Смагин, 2005], образующихся при активном таянии сезонно-мерзлых пород. Латеральными потоками растворенный CO_2 транспортируется с надмерзлотными водами к более низким участкам мезорельефа, которыми является болото. На границе торфяник – болото происходит резкая смена температуры (ее повышение), за счет чего CO_2 высвобождается в газообразном виде, обуславливая образование здесь «горячих точек» эмиссии и концентрации CO_2 . Локусы с экстремально высокими значениями концентрации выявлены и на торфянике, здесь они приурочены к местам наибольшего сезонного протаивания. Вероятно, тут высока роль физических процессов газопереноса – CO_2 «стекает» по столу мерзлоты и аккумулируется в понижениях, растворяясь в надмерзлотной верховодке, а не высвобождается в виде атмосферных потоков. Установленная с помощью корреляционного анализа прямая связь концентрации CO_2 и мощности СТС дополнительно это подтверждает. Не стоит забывать и о боковой диффузии газов, которая в торфяных почвах по сравнению с минеральными может протекать более активно за счет их горизонтальной слоистости. Благодаря этому процессу также возможны потери CO_2 в торфяных почвах.

Таким образом, содержание диоксида углерода на границе торфяник – олиготрофное болото отражает не столько функционирование непосредственно болота, а кумулятивный эффект, складывающийся из процессов газообмена и на болоте, и на торфянике. По мере удаления от торфяника, влияние поступающих с него потоков будет ослабевать и на каком-то расстоянии концентрация CO_2 в воде будет показывать функционирование непосредственно болота. Тут надо отметить, что поскольку торфяно-болотный комплекс сложен множеством торфяников, расположенных изолированно друг от друга, но на небольших расстояниях, найти «контрольные» точки, не подверженные влиянию потоков с торфяника, достаточно сложно. В замкнутых ложбинах, с трех сторон окруженных торфяниками, концентрация очень велика, что отражают трансекты 1 и 4. А вот линия, по которой проложена трансекта 2, не окружена торфяниками и находится в отдалении от них и имеет линейный характер уменьшения концентрации.

Некоторые вопросы вызывает отсутствие различий в эмиссии CO_2 почвами торфяника и олиготрофного болота, однако это вновь может быть связано с недоучетом потока CO_2 с поверхности торфяника и перераспределением этих потоков между торфяником и болотом. Кроме этого, 2018 г. ха-

рактеризовался стабильными и достаточно низкими температурами воздуха, что и повлияло на выравнивание показателей эмиссии в двух экосистемах: при более низких температурах газ лучше растворяется в растворе (в болотных водах), а при высоких в большей степени эмитирует. Несмотря на отсутствие в этот год тесной связи между температурой и эмиссией, наблюдается тенденция к прямой связи, поэтому полностью отказываться от связи температуры и эмиссии мы не можем.

Исследованные болотные воды существенно пересыщены углекислотой по отношению к атмосфере, так как превышают условное фоновое значение $350 \mu\text{atm}$ для северных экосистем [Tans, Fung, Takahashi, 1990]. Соответственно, при смене условий (например, повышение температуры) болотные воды могут стать значительным источником этого парникового газа в атмосферу, вызывая сдвиг углеродного баланса.

Установлено, что полученные значения по эмиссии CH_4 болотом являются характерными для почв западносибирских болот в летний период [Глаголев, Смагин, 2006; Глаголев, 2010]. Nilsson и соавт. [2001] отмечает крайне высокую (2–3 порядка) пространственную вариабельность потока метана из естественных болот, характерную и для проведенного нами исследования. Что касается торфяника, то рядом работ [Regina et al., 2007; Глаголев и др., 2008] показано снижение эмиссии CH_4 при его осушении, так как увеличивается аэробная зона торфяной залежи и происходит полное окисление растительных остатков и торфа с образованием CO_2 . Изученный нами торфяник частично развивается в автоморфных условиях, обеспечивая аэробные условия в почвенной толще, что и обуславливает низкие значения эмиссии метана. Близкие к нулю концентрации метана в поверхностных обводненных горизонтах изученных почв олиготрофного болота можно объяснить тем фактом, что воды здесь являются насыщенными кислородом, о чем говорят значения ОВП более +220 мВ.

Перельман [1975] определял воды с такой величиной как «характеризующиеся окислительной окислительно-восстановительной обстановкой» и «насыщенные кислородом». Метан чаще образуется в анаэробных условиях, при недостатке кислорода – в наших объектах это происходит на глубине более 20 см. При переносе газа к поверхности почвы значительная доля CH_4 может потребляться метанотрофными микроорганизмами [Глаголев и др., 2001], снижая поток этого газа с поверхности. Наумов [2009] отмечал, что верховые олиготрофные болота являются источниками метана только в теплый период и даже тогда интенсивность эмиссии низка.

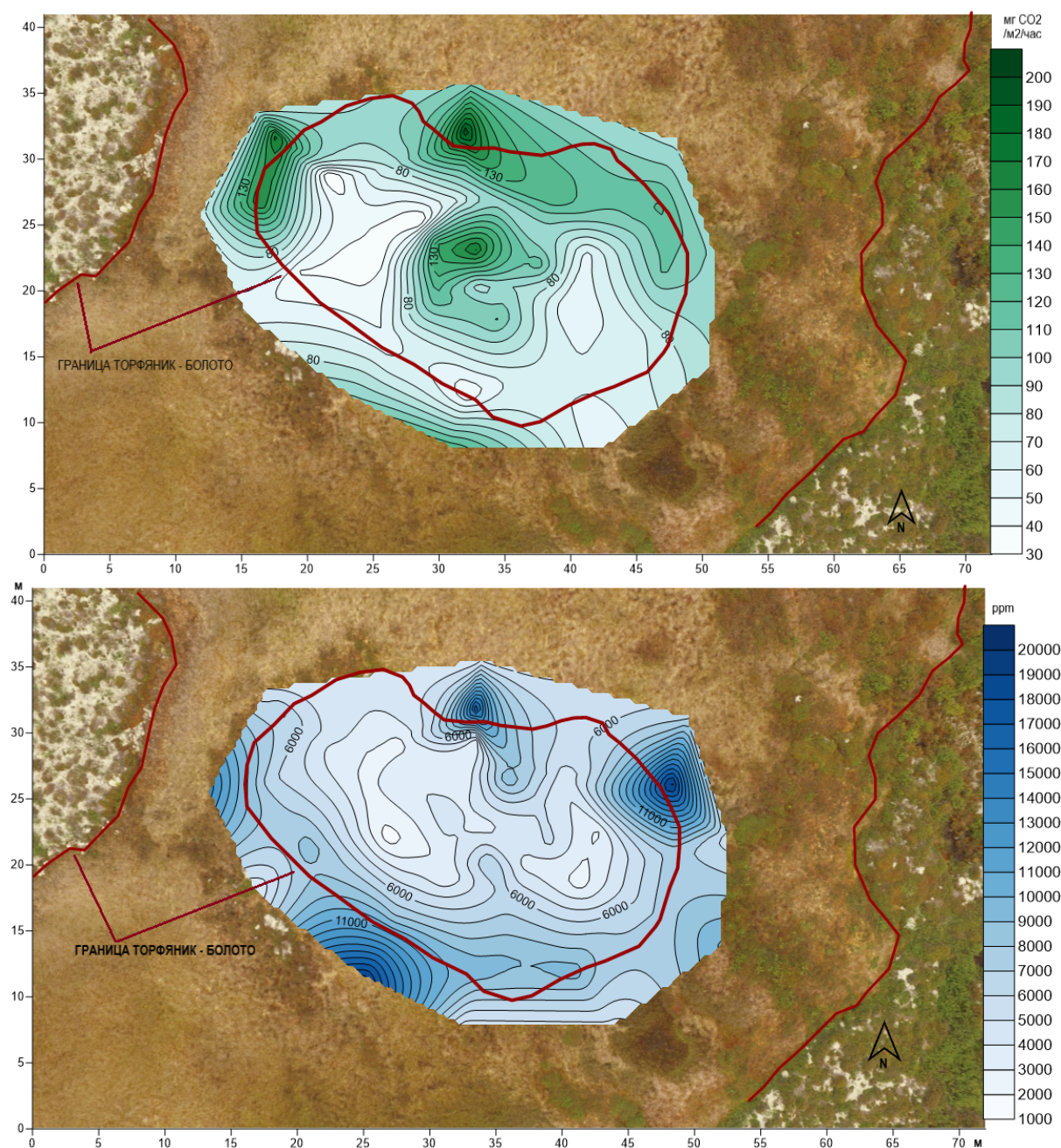


Рис. 6. Пространственное распределение эмиссии (а) и концентрации (б) CO_2 почвами торфяно-болотного комплекса

Fig. 6. C Spatial distribution of CO_2 efflux (a) and concentration (b) by the wetland complex soils

Взаимосвязь факторов среды и органических соединений углерода. Выявлено, что содержание органического углерода на торфяно-болотном комплексе высокое. Полученные значения пусть и сопоставимы с таковыми на некоторых аналогичных объектах Западной Сибири [Покровский, Широкова, Кирпотин, 2012; Раудина, 2016] и Канады [Glatzel, 2003], но несколько превышают данные по другим объектам бореального пояса России [Gandois et al., 2019],

Швеции [Olefeldt et al., 2012] и Канады [D'Acunha et al., 2019]. Более высокие концентрации РОУ почвенных надмерзлотных вод по сравнению с болотными, возможно, связаны с отсутствием сорбции органического вещества на минеральных компонентах почв. Близкое залегание ММП выступает водупором и является эффективным барьером для фильтрующихся почвенно-грунтовых вод [Woo, 1986], препятствуя их проникновению в более глу-

бокую минеральную толщу. Локальный ток воды обеспечивает транспорт и вынос всех растворенных веществ в болото. Потери органического углерода с торфяника возможны именно за счет этих вод. Торфяники, формирующиеся в криолитозоне, характеризуются специфической гидрологией [Yamazaki et al., 2005; Petrone et al., 2006] и взаимосвязи между почвенно-грунтовыми, болотными, надмерзлотными и поверхностными водами здесь очень сложные [White et al., 2008]. Зависят они от множества параметров, в первую очередь от характера распространения ММП и мощности СТС [Carey, 2003; Petrone et al., 2007], поэтому описанная картина вполне реальна. Благодаря высокой концентрации РОУ в почвенных растворах и отсутствию сорбции на минеральных компонентах торфяники могут выступать значительным источником органического углерода в сопряженные водные экосистемы. Frey, McClelland [2009] отмечали, что в целом наблюдается увеличение экспорта РОУ из районов с обширными торфяными отложениями. Это подтверждает возможный вынос РОУ.

Аналогичные результаты, когда РОУ на торфянике больше, чем в окружающем болоте, были получены Раудиной [2018]. Автор высказывал предположение о связи данного явления с адсорбцией РОУ минеральными горизонтами и криоконцентрацией растворенных веществ при замораживании почвенного раствора. Можно предположить, что если будет вскрываться минеральный горизонт (например, при потеплении и большем протаивании), то углерод будет сорбироваться и оставаться в пределах торфяника.

Заключение

Крупномасштабные исследования на локальном плоскобугристом мерзлом торфянике, окруженном олиготрофным болотом, показали наличие сложных многофункциональных связей между почвой, атмосферой и гидросферой с точки зрения перераспределения соединений углерода. Изученный торфяник поставляет углерод в сопряженные ландшафты в двух видах: неорганические соединения, представленные метаном и диоксидом углерода, а также углерод органического вещества (дисперсный и растворенный). Наличие «горячих точек» на границе торфяник – болото свидетельствует об активном переносе органического и неорганического углерода из торфяника в сопряженные водные экосистемы и возможном преобладании этого пути транспортировки соединений. Тот факт, что болотные воды пересыщены диоксидом углерода по сравнению с атмосферным воздухом, указывает на возможность этой экосистемы выступать значительным источником CO_2 при изменении условий среды (изменение температурного режима, например). При этом полугидроморфные и автоморфные экосистемы (плоскобугристые торфяники) также эмитируют газы, пусть и в меньшей степени. Однако при большем оттаивании ММП возможно увеличение экспорта РОУ и увеличение интенсивности эмиссии, что может вызвать сдвиги в углеродном балансе.

Список источников

- Бобрик А.А.** Закономерности эмиссии парниковых газов почвами северотаежных и лесотундровых экосистем Западной Сибири : дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2016. 166 с.
- Бобрик А.А., Рыжова И.И., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Макаров М.И., Волкер Д.А.** Эмиссия CO_2 и запасы органического углерода в почвах северотаежных экосистем Западной Сибири в различных геоэкологических условиях // Почвоведение. 2018. № 6. С. 674–682.
- Васильевская В.Д., Иванов В.В., Богатырев Л.Г.** Почвы Севера Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.
- Глаголев М.В., Лебедев В.С., Наумов А.В., Инишева Л.И., Дементьева Т.В., Головатская Е.А., Ерохин В.Е., Шнырев Н.А., Муханов В.В., Ножевникова А.Н.** Определение эмиссии и окисления метана некоторыми болотами Томской области // Функции почв в биосферно-геосферных системах : материалы междунар. симп. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 27–30 августа 2001 г. М.: МАКС Пресс, 2001. С. 148–149.
- Глаголев М.В., Смагин А.В.** Количественная оценка эмиссии метана болотами: от почвенного профиля до региона (к 15-летию исследований в Томской области) // Роль почв в биосфере. Труды Института экологического почвоведения Московского университета. 2006. Вып. 7. С. 51–83.
- Глаголев М.В.** Аннотированный список литературных источников по результатам экспериментальных измерений потоков парниковых газов (CH_4 и CO_2) из болот России // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1. С. 100–123.
- Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сирин А.А.** Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 46–58.
- Головатская Е.А., Дюкарев Е.А.** Влияние ландшафтных и гидрометеорологических условий на эмиссию CO_2 в торфоболотных экосистемах // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418, № 4. С. 1–4.
- Гончарова О.Ю., Бобрик А.А., Матышак Г.В., Макаров М.И.** Роль почвенного покрова в сохранении структурной и функциональной целостности северотаежных экосистем Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2016. № 1. С. 3–12.

- Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р. Оценка вклада корневого и микробного дыхания в общий поток CO₂ из торфяных почв и подзолов севера Западной Сибири методом интеграции компонентов // Почвоведение. 2019. № 2. С. 234–245.
- Курганова И.Н. Эмиссия и баланс углерода в наземных экосистемах России : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2010. 48 с
- Матвеева Н.В. Реакция растительного покрова на деградацию жильных льдов в Арктике // Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. М. : НИТГУ, 2017. С. 34–36.
- Матышак Г.В., Богатырев Л.Г., Гончарова О.Ю., Бобрик А.А. Особенности развития почв гидроморфных экосистем северной тайги Западной Сибири в условиях криогенеза // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1155–1164.
- Москаленко Н.Г., Бляхарчук Т.А., Понамарева О.Е. и др. Комплексный мониторинг северотаежных геосистем Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012.
- Наумов А.В. Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. 208 с.
- Наумов А.В. Современные процессы газообмена в сфагновых болотах лесостепной зоны Барабы (Западная Сибирь) // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18, № 5. С. 657–663.
- Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М. : Высш. шк., 1975. 342 с.
- Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н. Микробиологические факторы, контролирующие цикл углерода в термокарстовых водных объектах Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 3. С. 199–217.
- Раудина Т.В., Лойко С.В., Крицков И.В., Лим А.Г. Сравнение состава почвенных вод мерзлых болот Западной Сибири, полученных различными // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2016. № 3 (35). С. 26–42.
- Раудина Т.В. Состав и свойства жидкой фазы торфяных почв криолитозоны Западной Сибири : дис. ... канд. биол. наук. М. : НИТГУ, 2018. С. 1–186.
- Смагин А.В. Газовая фаза почв. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2005. 301 с.
- Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М. : ГЕОС, 2006. 400 с.
- Carey S.K. Dissolved organic carbon fluxes in a discontinuous permafrost subarctic alpine catchment // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. V. 14 (2). P. 161–171.
- Christ M.J., David M.B. Dynamics of extractable organic carbon in Spodosol forest floors // Soil Biol. Biochem. 1996. V. 28. P. 1171–1179.
- D'A Cunha B., Morillas L., Black T.A., Christen A., Johnson M.S. Net Ecosystem Carbon Balance of a Peat Bog Undergoing Restoration: Integrating CO₂ and CH₄ Fluxes from Eddy Covariance and Aquatic Evasion with DOC Drainage Fluxes // Journal of Geophysical Research Biogeosciences. 2019. V. 124 (4). P. 884–901.
- Dawson H.J., Ugolini E.C., Hrutford B.F., Zachara J. Role of soluble organics in the soil processes of a podzol, Central Cascades, Washington // Soil Sci. 1978. V. 126. P. 290–296.
- Evans C., Monteith D., Cooper D. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts // Environmental Pollution. 2005. V. 137. P. 55–71.
- Fellman J.B., D'Amore D.V., Hood E., Boone R.D. Fluorescence characteristics and biodegradability of dissolved organic matter in forest and wetland soils from coastal temperate watersheds in southeast Alaska // Biogeochemistry. 2008. V. 88. P. 169–184.
- Fenner N., Freeman C. Drought-induced carbon loss in peatlands // Nature geoscience. 2011. V. 4. P. 895–900.
- Flessa H., Ludwig B., Heil B., Merbach W. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term maize experiment in Halle, Germany, determined by ¹³C natural abundance // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2000. V. 163. P. 157–163.
- Freeman C., Evans C., Monteith D., Reynolds B., Fenner N. Export of organic carbon from peat soils // Nature. 2001. V. 412. P. 785–785.
- Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // Hydrological Processes. 2009. 23L. P. 169–182.
- Gandois L., Hoyt A.M., Hatté C., Jeanneau L., Teisserenc R., Liotaud M., Tananaev N. Contribution of Peatland Permafrost to Dissolved Organic Matter along a Thaw Gradient in North Siberia // Environmental Science & Technology. 2019. V. 53 (24). P. 14165–14174.
- Glatzel S., Kalbitz K., Dalva M., Moore T. Dissolved organic matter properties and their relationship to carbon dioxide efflux from restored peat bogs // Geoderma. 2003. V. 113. P. 397–411.
- Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Moskalenko N.G., Ponomareva O.E. Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48 (12). P. 1329–1340.
- Halbedel S. Protocol for CO₂ sampling in waters by the use of the headspace equilibration technique, based on the simple gas equation; second update. Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited, 2018.
- Hope D., Billet M.F., Cresser M.S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes // Environmental Pollution 1994. V. 84. P. 301–324.
- Hope D., Palmer S.M., Billett M.F., Dawson J.J.C. Variations in dissolved CO₂ and CH₄ in a headwater catchment: an investigation of soilstream linkages // Hydrological Process. 2004. V. 18. P. 55–75.
- Jones J.B., Mulholland P.J. Influence of drainage basin topography and elevation on carbon dioxide and methane supersaturation of stream water // Biogeochemistry. 1998. V. 40. P. 57–72.
- Kaiser K., Guggenberger G., Haumaier L., Zech W. Seasonal variations in the chemical composition of dissolved organic matter in organic forest floor layer leachates of old-growth Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands in northeastern Bavaria, Germany // Biogeochemistry. 2001. V. 55. P. 103–143.
- Karlsson J., Christensen T.R., Crill P., Forster J., Hammarlund D., Jackowicz-Korczynski M., Kokfelt U., Roehm C., Rosen P. Quantifying the relative importance of lake emissions in the carbon budget of a subarctic catchment // J. Geophys. Res. 2010. V. 115.

- Kling G.W., Kipphut G.W., Miller M.C.** Arctic lakes and streams as conduits to the atmosphere: implications for tundra carbon budgets // *Science*. 1991. V. 251. P. 298–301.
- Limpens J., Berendse F., Blodau C., Canadell J. G., Freeman C., Holden J., Roulet N., Rydin H., and Schaepman-Strub G.** Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis // *Biogeosciences*. 2008. V. 5. P. 1475–1491.
- Lofts S., Woof C., Tipping E., Clarke N., Mulder J.** Modelling pH buffering and aluminium solubility in European forest soils // *European Journal of Soil Science*. 2001. V. 52. P. 189–204.
- McDowell W.H., Likens G.E.** Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook valley // *Ecological Monographs*. 1988. V. 58. P. 177–195.
- Michalzik B., Matzner E.** Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem // *Europ. J. Soil Sci.* 1999. V. 50 (4). P. 579–590.
- Moore T.R., Paré D., Boutin R.** Production of dissolved organic carbon in Canadian forest soils // *Ecosystems*. 2008. V. 11. P. 740–751.
- Neff J.C., Asner G.P.** Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model // *Ecosystems*. 2001. V. 4. P. 29–48.
- Nasholm T., Ekblad A., Nordin A., Giesler R., Hogberg M., Hogberg P.** Boreal forest plants take up organic nitrogen // *Nature*. 1998. V. 392. P. 914–916.
- Nilsson M., Mikkilä C., Sundh I., Granberg G., Svensson B.H., Ranneby B.** Methane emission from Swedish mires: National and regional budgets and dependence on mire vegetation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. V. 106 (D18). P. 20847–20860.
- Olefeldt D., Roulet N.T.** Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117.
- Pagano T., Bida M., Kenny J.E.** Trends in Levels of Allochthonous Dissolved Organic Carbon in Natural Water: A Review of Potential Mechanisms under a Changing Climate // *Water*. 2014. V. 6. P. 2862–2897.
- Petrone K.C., Jones J.B., Hinzman L.D., Boone R.D.** Seasonal export of carbon, nitrogen, and major solutes from Alaskan catchments with discontinuous permafrost // *Journal of Geophysical Research*. 2006. V. 111: G02020.
- Regina K., Pihlatie M., Esala M., Alukukku L.** Methane fluxes on boreal arable soils // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2007. V. 119. P. 346–352.
- Schnitzer M., Khan S.U.** Humic substances in the environment. Marced Dekkar. New York, 1972.
- Stumm W., Morgan J.J.** Aquatic Chemistry. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1981.
- Raulund-Rasmussen K., Borregaard O.K., Hansen H.C.B., Olsson M.** Effect of natural soil solutes on weathering rates of soil minerals // *Eur. J. Soil Sci.* 1998. V. 49. P. 397–406.
- Sobek S., Algesten G., Bergström A.K., Jansson M., Tranvik L. J.** The catchment and climate regulation of pCO₂ in boreal lakes // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. P. 630–641.
- Tans P.P., Fung I.Y., Takahashi T.** Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget // *Science*. 1990. No. 247. P. 1431–1438.
- Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S.** Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles*. 2009. V. 23.
- Wetzel R.G.** Limnology. 2nd ed. Philadelphia, PA : Saunders College Publishing, 1983.
- Wetzel R.G., Likens G.E.** Limnological Analysis. 2nd ed. New York : Springer-Verlag, 1991.
- White J.R., Shannon R.D., Weltzin J.F., Pastor J., Bridgham S.D.** Effects of soil warming and drying on methane cycling in a northern peatland mesocosm study // *J. Geophys. Res. G: Biogeo.* 2008. V. 113: G00A06.
- Woo M.** Permafrost hydrology in North America // *Atmosphere Ocean*. 1986. V. 24, No. 3. P. 201–234.
- Xu J.G., Juma N.G.** Above- and below-ground transformation of photosynthetically fixed carbon by two barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in a Typic Cryoboroll // *Soil Biol. Biochem.* 1993. V. 25. P. 1263–1272.
- Yamazaki Y., Kubota J., Ohata T., Vuglinsky V., Mizuyama T.** Seasonal changes in runoff characteristics on a permafrost watershed in the southern mountainous region of eastern Siberia // *Hydrological Processes*. 2005. No. 20. P. 453–467.
- Zsolnay A.** Dissolved humus in soil waters // *Humic substances in terrestrial ecosystems* / ed. by A. Piccolo. Amsterdam : Elsevier. 1996. P. 171–223.

References

- Bobrik A.A.** *Zakonomernosti emissii parnikovykh gazov pochvami severotaezhnykh i lesotundrovnykh ekosistem Zapadnoy Sibiri* [Regularities of greenhouse gas emission by soils of northern taiga and forest-tundra ecosystems of Western Siberia] // *Diss. ...kand.biol.nauk*. 2016. Moscow : MSU. 166 p. In Russian
- Bobrik A.A., Ryzhova I.M., Goncharova O.Yu, Matyshak G.V., Makarov M.I., Walker D.A.** CO₂ emission and organic carbon pools in soils of the northern taiga ecosystems of Western Siberia under different geocryological conditions // *Eurasian Soil Science*. 2018. V. 51. No. 6. pp. 628–636.
- Vasil'evskaya V.D., Ivanov V.V., Bogatyrev L.G.** *Pochvy Severa Zapadnoy Sibiri* [Soils of the north of Western Siberia]. Moscow : Izd-vo Mosk. Un-ta. 1986. In Russian
- Glagolev M.V., Lebedev V.S., Naumov A.V., Inisheva L.I., Dement'eva T.V., Golovatskaya E.A., Erokhin V.E., Shnyrev N.A., Mukhanov V.V., Nozhevnikova A.N.** *Opredelenie emissii i okisleniya metana nekotorymi bolotami Tomskoy oblasti* [Determination of emission and oxidation of methane by some bogs of the Tomsk region] // *Funktsii pochv v biosferno-geosfernykh sistemakh. Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma: Moskva, MGU im. M.V. Lomonosova, 27–30 avgusta 2001 g.* Moscow : MAKSS Press. pp. 148–149. In Russian
- Glagolev M.V., Smagin A.V.** *Kolichestvennaya otsenka emissii metana bolotami: ot pochvennogo profilya do regiona (k 15-letiyu issledovaniy v Tomskoy oblasti)* [Quantitative estimation of methane emission by palusa mires: from the soil profile to the region (by the

- 15th year of research in the Tomsk region)] // Rol' pochv v biosfere. Tr. In-ta ekologicheskogo pochvovedeniya. Mosk. un-ta. 2006. V. 7. pp. 51–83. In Russian
- Glagolev M.V. Annotated reference list of CH₄ and CO₂ flux measurements from Russia mires // Environmental dynamics and global climate change. 2010. V. 1. pp. 100–123. In Russian
- Glagolev M.V., Chistotin M.V., Shnyrev N.A., Sirin A.A. The emission of carbon dioxide and methane from drained peatlands changed by economic use and from natural mires during the summer-fall period (on example of a region of Tomsk Oblast) // Agrochemistry. 2008. No. 5. pp. 46–58. In Russian
- Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A., Ippolitov I.I., Kabanov M.V. *Vliyaniye landshaftnykh i gidrometeorologicheskikh usloviy na emissiyu CO₂ v torfobolotnykh ekosistemakh* [Influence of landscape and hydrometeorological conditions on CO₂ emission in peat bog ecosystems] // Doklady Earth Sciences. V. 418. pp. 539–542. In Russian
- Goncharova O.Yu., Bobrik A.A., Matyshak G.V., Makarov M.I. The role of soil cover in maintaining the structural and functional integrity of northern taiga ecosystems in western siberia // Contemporary Problems of Ecology. 2016. V. 9. No. 1. pp. 1–8.
- Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Timofeeva M.V., Sefilyan A.R. Assessment of the contribution of root and microbial respiration to the total efflux of CO₂ from peat soils and podzols in the north of western siberia by the method of component integration // Eurasian Soil Science. 2019. V. 52. No. 2. pp. 206–217.
- Kurganova I.N. *Emissiya i balans ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* [Carbon emissions and balance in the terrestrial Ecosystems in Russia] // Avtoref. dis. ... d-ra biol. nauk. Moscow, 2010. 48 p. In Russian
- Matveeva N.V. *Reaktsiya rastitel'nogo pokrova na degradatsiyu zhil'nykh l'dov v Arktike* [Vegetation cover reaction to degradation of ice wedges in Arctic] // Zapadnosibirskie torfyaniki i tsikl ugleroda: proshloe i nastoyashchee. 2017. Moscow: NITGU. pp. 34–36. In Russian
- Matyshak G.V., Bogatyrev L.G., Goncharova O.Yu., Bobrik A.A. Specific features of the development of soils of hydromorphic ecosystems in the northern taiga of western siberia under conditions of cryogenesis // Eurasian Soil Science. 2017. V. 50. No. 10. pp. 1115–1124.
- Moskalenko N.G., Blyakharchuk T.A., Ponamareva O.E. *Kompleksnyy monitoring severotaezhnykh geosistem Zapadnoy Sibiri* [Integrated monitoring of the northern taiga geosystems of Western Siberia] // Ros.Akad. Nauk. Sib. otdelenie, Institut kriosfery Zemli. 2012. In Russian
- Naumov A.V. Soil respiration: constituents, ecological functions, geographic patterns. Novosibirsk: SB RAS Publishing House. 2008. 208 p.
- Naumov A.V. Modern gas-exchange processes in forest-steppe sphagnum bogs in the Baraba (West Siberia) // Contemp. Probl. Ecol. 2011. No. 4. pp. 487–491.
- Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow : Higher. Shk., 1975. 342 p. In Russian
- Pokrovskiy O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N. Microbiological factors controlling carbon cycle in thermokarst water bodies of Western Siberia // Tomsk State University Journal of Biology. 2012. No. 3 (19). pp. 199–217. In Russian
- Raudina T.V., Loyko S.V., Kritskov I.V., Lim A.G. Comparing the composition of soil waters of West Siberian frozen mires sampled by different methods // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Tomsk State University Journal of Biology. 2016. V. 3 (35). pp. 26–42. In Russian,
- Raudina T.V. *Sostav i svoystva zhidkoy fazy torfyanykh pochv kriolitozony Zapadnoy Sibiri* [Composition and properties of the liquid phase of peat soils in the permafrost zone of Western Siberia] // Diss. ... kand. biol.nauk. Moscow : NITGU. 2018. pp. 1–186. In Russian
- Smagin A.V. *Gazovaya faza pochv* [The gaseous phase of soils]. Moscow St. Univ. Soil Sci. Dept. 2005. 301 p. In Russian
- Edd. Vorobyova L.F. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and practice chemical analysis of soils]. Moscow : GEOS, 2006. 400 p. In Russian
- Carey S.K. Dissolved organic carbon fluxes in a discontinuous permafrost subarctic alpine catchment // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. 14(2). pp. 161–171
- Christ M.J., David M.B. Dynamics of extractable organic carbon in Spodosol forest floors // Soil Biol. Biochem. 1996. V. 28. pp. 1171–1179.
- D'Acunha, B., L. Morillas, T. A. Black, A. Christen, and M. S. Johnson. Net Ecosystem Carbon Balance of a Peat Bog Undergoing Restoration: Integrating CO₂ and CH₄ Fluxes from Eddy Covariance and Aquatic Evasion with DOC Drainage Fluxes." // Journal of Geophysical Research Biogeosciences. 2019. 124 (4) pp. 884–901.
- Dawson H.J., Ugolini E.C., Hrutfiord B.F., Zachara J. Role of soluble organics in the soil processes of a podzol, Central Cascades, Washington // Soil Sci. 1978. V. 126. pp. 290–296.
- Evans C., Monteith D., Cooper D. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: observations, possible causes and environmental impacts // Environmental Pollution. 2005. V. 137. pp. 55–71.
- Fellman J.B., D'Amore D.V., Hood E., Boone R.D. Fluorescence characteristics and biodegradability of dissolved organic matter in forest and wetland soils from coastal temperate watersheds in southeast Alaska // Biogeochemistry. 2008. V. 88. pp. 169–184
- Fenner N., Freeman C. Drought-induced carbon loss in peatlands // Nature geoscience. 2011. V. 4. pp. 895–900.
- Flessa H., Ludwig B., Heil B., Merbach W. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term maize experiment in Halle, Germany, determined by ¹³C natural abundance // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2000. V. 163. pp. 157–163.
- Freeman C., Evans C., Monteith D., Reynolds B., Fenner N. Export of organic carbon from peat soils // Nature. 2001. V. 412. pp. 785–785
- Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // Hydrological Processes. 2009. 23L. pp. 169–182.
- Gandois L., Hoyt A.M., Hatté C., Jeanneau L., Teisserenc R., Liotaud M., Tananaev N. Contribution of Peatland Permafrost to Dissolved Organic Matter along a Thaw Gradient in North Siberia // Environmental Science & Technology. 2019. V. 53 (24). pp. 14165–14174.
- Glatzel S., Kalbitz K., Dalva M., Moore T. Dissolved organic matter properties and their relationship to carbon dioxide efflux from restored peat bogs // Geoderma. 2003. V. 113. pp. 397–411

- Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Moskalenko N.G., Ponomareva O.E. Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia // *Eurasian Soil Science*. 2015. V. 48, No. 12. pp. 1329–1340.
- Halbedel S. Protocol for CO₂ sampling in waters by the use of the headspace equilibration technique, based on the simple gas equation; second update // Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited. 2018
- Hope D., Billet M.F., Cresser M.S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes // *Environmental Pollution* 1994. V. 84. pp. 301–324.
- Hope D., Palmer S.M., Billett M.F., Dawson J.J.C. Variations in dissolved CO₂ and CH₄ in a headwater catchment: an investigation of soilstream linkages // *Hydrol Process* 2004. V. 18. p. 55–75.
- Jones J.B., Mulholland P.J. Influence of drainage basin topography and elevation on carbon dioxide and methane supersaturation of stream water // *Biogeochemistry*. 1998. V. 40. pp. 57–72.
- Kaiser K., Guggenberger G., Haumaier L., Zech W. Seasonal variations in the chemical composition of dissolved organic matter in organic forest floor layer leachates of old-growth Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands in northeastern Bavaria, Germany // *Biogeochemistry*. 2001. V. 55. pp. 103–143.
- Karlsson J., Christensen T.R., Crill P., Forster J., Hammarlund D., Jackowicz-Korczynski M., Kokfelt U., Roehm C., Rosen P. Quantifying the relative importance of lake emissions in the carbon budget of a subarctic catchment // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115.
- Kling G.W., Kipphut G.W., Miller M.C. Arctic lakes and streams as conduits to the atmosphere: implications for tundra carbon budgets // *Science*. 1991. V. 251. pp. 298–301.
- Limpens J., Berendse F., Blodau C., Canadell J. G., Freeman C., Holden J., Roulet N., Rydin H., and Schaepman-Strub G. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis // *Biogeosciences*. 2008. V. 5. pp. 1475–1491
- Lofts S., Woof C., Tipping E., Clarke N., Mulder J. Modelling pH buffering and aluminium solubility in European forest soils // *European Journal of Soil Science*. 2001. V. 52. pp. 189–204.
- McDowell W.H., Likens G.E. Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook valley // *Ecological Monographs*. 1988. V.58. pp. 177–195
- Michalzik B., Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem // *Europ. J. Soil Sci.* 1999. V. 50(4). pp. 579–590.
- Moore T.R., Paré D., Boutin R. Production of dissolved organic carbon in Canadian forest soils // *Ecosystems*. 2008. V. 11. pp. 740–751.
- Neff J.C., Asner G.P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model // *Ecosystems*. 2001. V. 4. pp. 29–48.
- Nasholm T., Ekblad A., Nordin A., Giesler R., Hogberg M., Hogberg P. Boreal forest plants take up organic nitrogen // *Nature*. 1998. V. 392. pp. 914–916.
- Nilsson M., Mikkilä C., Sundh I., Granberg G., Svensson B.H., Ranneby B. Methane emission from Swedish mires: National and regional budgets and dependence on mire vegetation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2001. V. 106 (D18). P. 20847–20860.
- Olefeldt D., Roulet N.T. Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a sub-arctic peatland complex // *J. Geophys. Res.* 2012. 117
- Pagano T., Bida M., Kenny J.E. Trends in Levels of Allochthonous Dissolved Organic Carbon in Natural Water: A Review of Potential Mechanisms under a Changing Climate // *Water*. 2014. V. 6. pp. 2862–2897.
- Petrone K.C., Jones J.B., Hinzman L.D., Boone R.D. Seasonal export of carbon, nitrogen, and major solutes from Alaskan catchments with discontinuous permafrost // *Journal of Geophysical Research*. 2006. 111: G02020
- Regina K., Pihlatie M., Esala M., Alukukku L. Methane fluxes on boreal arable soils // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2007. V. 119. pp. 346–352.
- Schnitzer M., Khan S.U. Humic substances in the environment. Marced Dekkar. New York. 1972
- Stumm W., Morgan J.J. Aquatic Chemistry, 2nd ed. John Wiley & Sons: New York. 1981.
- Raulund-Rasmussen K., Borregaard O.K., Hansen H.C.B., Olsson M. Effect of natural soil solutes on weathering rates of soil minerals // *Eur. J. Soil Sci.* 1998. V. 49. pp. 397–406.
- Sobek S., Algesten G., Bergström A.K., Jansson M., Tranvik L. J. The catchment and climate regulation of pCO₂ in boreal lakes // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. pp. 630–641
- Tans P.P., Fung I.Y., Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget // *Science*. 1990. №247. pp. 1431–1438.
- Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycles*. 2009. V. 23.
- Wetzel R.G. Limnology, 2nd edn. Saunders College Publishing: Philadelphia, PA. 1983
- Wetzel R.G., Likens G.E. Limnological Analysis, 2nd edn. Springer-Verlag: New York. 1991.
- White J.R., Shannon R.D., Weltzin J.F., Pastor J., Bridgman S.D. Effects of soil warming and drying on methane cycling in a northern peatland mesocosm study // *J. Geophys. Res. G: Biogeo.* 2008. 113: G00A06 .
- Woo M. Permafrost hydrology in North America // *Atmosphere Ocean*. 1986. 24. 3. pp. 201–234.
- Xu J.G., Juma N.G. Above- and below-ground transformation of photosynthetically fixed carbon by two barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in a Typical Cryoboroll // *Soil Biol. Biochem.* 1993. V.25. pp. 1263–1272.
- Yamazaki Y., Kubota J., Ohata T., Vuglinsky V., Mizuyama T. Seasonal changes in runoff characteristics on a permafrost watershed in the southern mountainous region of eastern Siberia // *Hydrological Processes*. 2005. No. 20. pp. 453–467.
- Zsolnay A. Dissolved humus in soil waters // *Humic substances in terrestrial ecosystems*. Ed. Piccolo A. Amsterdam: Elsevier. 1996. pp. 171–223.

Информация об авторах:

Тимофеева М.В., инженер-исследователь, лаборатория физики и гидрологии почв, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия.

E-mail: mtimofeeva02@gmail.com

Гончарова О.Ю., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, кафедра общего почвоведения, факультет почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

E-mail: goncholga@gmail.com

Матышак Г.В., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, кафедра общего почвоведения, факультет почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

E-mail: matyshak@gmail.com

Чуванов С.В., младший научный сотрудник, отдел генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия.

E-mail: stas.chuvanov@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Timofeeva M.V., Research Assistant, Laboratory of Soil Physics and Hydrology, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia.

E-mail: mtimofeeva02@gmail.com

Goncharova O.Y., Cand. Sci. (Biology), Researcher, Department of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

E-mail: goncholga@gmail.com

Matyshak G.V., Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Department of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.

E-mail: matyshak@gmail.com

Chuvanov S.V., Junior Researcher, Department of Genesis, Geography, Classification and Digital Cartography of Soils, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia.

E-mail: stas.chuvanov@gmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.10.2021; одобрена после рецензирования 04.12.2021; принята к публикации 12.09.2022

The article was submitted 08.10.2021; approved after reviewing 04.12.2021; accepted for publication 12.09.2022