

SEASONAL DYNAMICS OF METHANE EMISSION FROM SOILS OF WET FORESTS: A CASE STUDY OF A MIXED FOREST IN THE MOSCOW REGION

Runkov R.A.^{1,2}, Glagolev M.V.^{1,2,3*}, Sabrekov A.F.², Ilyasov D.V.²

¹⁾ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²⁾ Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

³⁾ Институт лесоведения РАН, пос. Успенское (Московская обл.)

*m_glagolev@mail.ru

Citation: Runkov R.A., Glagolev M.V., Sabrekov A.F., Ilyasov D.V. 2025. Seasonal dynamics of methane emission from soils of wet forests: A case study of a mixed forest in the Moscow region. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 16(4): 152-166.

DOI: 10.18822/edgcc629924

АННОТАЦИЯ

Эмиссия метана из исследованных почв переувлажненных смешанных лесов в Московской области варьировала в диапазоне от -0.06 до 19,5 мгС×м⁻²×ч⁻¹, достигая максимальных значений в летние месяцы с обильными осадками и минимальных – зимой. Обнаружение значительных удельных потоков метана из переувлажненных почв лесов (порядка одной трети типичных «болотных» удельных потоков) требует пересмотра роли лесов в общем балансе CH₄ в современный период и тем более при прогнозируемом изменении климата.

Ключевые слова: потоки метана, изменение климата, избыточно увлажненные леса, заболоченные леса, переувлажненные леса, сезонные флуктуации, сезонные колебания.

ABSTRACT

Methane (CH₄) the second most potent greenhouse gas in terms of contribution to global warming. Natural sources of methane includes wetlands and other freshwater ecosystems, oceans, natural gas seeps, biomass burning, and termites. However, the contribution of other natural sources should not be underestimated. One such potential source is wet forests, i.e., forests with soils under conditions of constant or temporary waterlogging. Unlike peatlands, forest ecosystems exhibit greater diversity and variability in terms of physico-chemical (e.g., nutrient availability, acidity, redox conditions) and hydrological factors (including periodic flooding and drainage), complicating their study. The magnitude of methane emissions from this source remains uncertain, but fluxes from wet forest soils may be significant. The aim of this study is to assess wet forests as potential methane sources, considering the seasonal variability of observed fluxes (case study of a mixed forest in the Moscow region).

Measurements were conducted from 2019 to 2022 at a wet forest in the Ruzsky District of Moscow Oblast, near the settlement of Dorokhovo. The study site (55°34' N, 36°23' E) is located 67 km west of Moscow's city boundary. The soils of the study site are Umbry-Gleyic Albeluvisols (soddy-podzolic gleyic soils) with silty clay loam texture. The vegetation is presented by a mixed forest dominated by *Alnus glutinosa*, *Quercus robur*, *Acer platanoides*, *Asarum europaeum*, and *Mercurialis perennis*. The long-term mean annual air temperature and precipitation for the study site are 5.8°C and 688 mm, respectively.

Twelve field campaigns were carried out in different seasons. Summer campaigns: 5–24 August 2019, 5–25 July 2020, 10–11 and 29–30 August 2021. Autumn campaigns: 24–25 October 2020, 9–10 October and 6 November 2021. Winter campaigns: 9 January and 26 February 2022. Spring campaigns: 8–9 March 2022 and 2–4 May 2022. Methane fluxes were measured using the static chamber method. At each measurement point, 2 to 4 chambers were deployed, with 2 to 19 flux measurements taken per chamber over a 24-hour period, which were treated as replicates. Four gas samples were taken in syringes during each of 9-60 minute flux measurement. Methane concentration in the gas samples was determined by gas chromatography. In 2022, gas concentration inside of the chamber was measured directly using a portable infrared gas analyzer LI-7810 (LI-COR, USA). Additionally, soil temperature and moisture, pH and electrical conductivity of soil water, as well as water table level (WTL) were measured.

Seven points were chosen on a transect from the point Sw1_1 with the average WTL of 31 cm above the soil surface to the point Sw1_7 with the average WTL of 11 cm below the soil surface. The median methane flux at Sw1_1 and Sw1_3, points with the best drainage on the transect, was close to zero, while the maximum flux exceeded 1 mgC×m⁻²×h⁻¹. At the downslope point Sw1_5, the mean WTL was 15 cm below the surface. Unlike the upslope points, no methane consumption was observed here; the median emission was 0.5 mgC×m⁻²×h⁻¹, with a maximum of 6.8 mgC×m⁻²×h⁻¹. At the further downslope point Sw1_2 (mean WTL = 0 cm), the median emission was comparable to that at point Sw1_5, but the maximum emission reached 20 mgC×m⁻²×h⁻¹. Finally, at points Sw1_4, Sw1_6, and

Sw1_7, where the WTL was between 5 and 11 cm above the soil surface, the median flux ranged from 1.4 to 4 mgC×m⁻²×h⁻¹, with maximum from 13 to 18 mgC×m⁻²×h⁻¹. A relatively strong correlation was found exclusively between the median methane flux and WTL ($R^2 = 0.63$). For all other investigated factors, the coefficients of determination did not exceed $R^2 = 0.27$. Furthermore, the raw data (prior to median calculation) showed no significant regression dependence with any of the factors. Our results correspond to the published data on methane emissions from wet forests in the temperate climatic zone and the southern taiga forests of Western Siberia. Similar median emission values were also observed in a tropical forest in the Congo River basin, although the maximum emission values there were several times higher.

Therefore, our findings indicate that wet forests in the Moscow region can be a source of atmospheric CH₄. Because of the cold seasons of the Moscow region (and, more broadly, the European part of Russia) is relatively warm, methane emissions during the autumn-winter-spring period likely make a significant contribution to the annual flux. Future research should focus on: (1) more precise mapping of wet forest coverage, (2) investigating the mechanism of methane transport by trees and plants in wet forests, (3) studying the spatial variability of methane fluxes across different types of wet forests, (4) quantifying the relative contribution of diffusive and advective methane transport in mineral soils, and (5) understanding the functioning of methanogenic communities under relatively limited (compared to peatlands) availability of carbon sources.

Keywords: methane fluxes, climate change, waterlogged forests, swamp forests, seasonal fluctuations, seasonal variations.

Принятые сокращения

ВМО – Всемирная метеорологическая организация;

Тг – тераграмм (эквивалентно 10¹² грамм);

УП – удельный поток;

УГВ (или WTL) – уровень грунтовых вод;

ПИД – пламенно-ионизационный детектор.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема парникового эффекта

Состав газов в атмосфере влияет на функционирование экосистем и помогает регулировать температуру Земли, в том числе за счет естественного парникового эффекта (ПЭ). ПЭ – повышение температуры в нижних слоях атмосферы по сравнению с температурами планетарного теплового излучения, наблюдаемого из космоса [Khromov, Mamontova, 1974: с. 317, 330]. Некоторые газы, такие как водяной пар (H₂O), углекислый газ (CO₂), метан (CH₄) и ряд других, концентрация которых в атмосфере незначительна, поглощают часть теплового излучения (в инфракрасном диапазоне), идущего от земной поверхности, нагретой приходящей солнечной энергией коротковолнового диапазона. Это способствует удержанию тепла в атмосфере и поддержанию температуры Земли в пределах, пригодных для жизни. Однако при увеличении концентрации парниковых газов в атмосфере температура планеты может подняться слишком высоко, вызывая различные проблемы, связанные с изменением климата (такие как изменение количества осадков, ведущее к опустыниванию или заболачиванию в различных регионах, увеличение количества экстремальных погодных явлений и др.) [Semenov et al., 2018].

Большинство исследователей сходятся во мнении, что постепенное изменение климата, а именно повышение средней температуры приземного слоя воздуха примерно на 0.6°C за индустриальную эпоху, связано с увеличением концентрации диоксида углерода и метана в атмосфере [Albritton et al., 2001]. По данным Всемирной метеорологической организации, концентрация CO₂ возросла с 280 ppm (1750 г.) до 400 ppm (2015 г.). Предполагается, что в 2100 г. концентрация CO₂ будет находиться в пределах от 540 до 970 ppm. Половина всех выбросов CO₂ остается в атмосфере 50-200 лет, в то время как другая половина поглощается океаном, сушей и растительностью [Berdin et al., 2004].

Также весьма важную роль в парниковом эффекте играет метан. Хотя в атмосфере концентрация метана гораздо меньше, чем концентрация CO₂, 20-летний потенциал глобального потепления CH₄ примерно в 39 раз выше, и поэтому вклад метана в формирование парникового эффекта составляет 30% от величины, принятой для двуокиси углерода [Albritton et al., 2001]. В настоящее время средняя концентрация метана в атмосфере превышает 1.866 ppm [IPCC, 2023]. Она мало зависит от высоты (от поверхности Земли до тропопаузы – 12 км), так как CH₄ быстро (примерно за 1 месяц) перемешивается по высоте [Warneck, 1988].

Роль различных экосистем как источников метана

В атмосфере метан не образуется, а его поступление в атмосферу считается результатом выбросов с земной поверхности [Karol, Kiselyov, 2004]. Для мониторинга эмиссии парниковых газов используются различные методы анализа изменений в составе атмосферы. Команда исследователей Global Carbon Project (GCP) провела подсчет глобальной эмиссии метана в период 2008-2017 гг. с помощью метода обратной задачи (с принципом метода можно ознакомиться, например, в [Haas-Laurson et al., 1996; Hein et al., 1996; Glagolev, Sabrekov, 2012]). Общий поток CH_4 был оценен в $576 \text{ Тг} \cdot \text{год}^{-1}$, при этом 60% ($\sim 359 \text{ Тг} \cdot \text{год}^{-1}$) приходилось на антропогенные источники. Среднегодовой объем эмиссии в 2008-2017 гг. больше на 24 Тг CH_4 по сравнению с периодом 2003-2012 гг. [Saunio et al., 2020].

Метан имеет множество естественных источников, в том числе [Karol, Kiselyov, 2004: p. 49; Anderson et al., 2010]:

- *Водно-болотные угодья.* Крупнейшим естественным источником метана являются водно-болотные угодья, поток CH_4 с поверхности которых оценивается примерно в $177\text{--}231 \text{ Тг} \cdot \text{год}^{-1}$ [IPCC, 2023]. Важным источником метана болота делают повышенная влажность, анаэробные условия, а также разложение органического вещества, которое происходит в условиях недостатка кислорода.
- *Океан* – $10\text{--}17 \text{ Тг} \cdot \text{год}^{-1}$. Метан естественным образом образуется в океане микроорганизмами, которые живут как в слоях донных отложений, так и непосредственно в водной толще.
- *Пресные воды* – $5 \text{ Тг} \cdot \text{год}^{-1}$. Образование метана в пресноводных водоемах происходит в донных отложениях, а также в анаэробных слоях димиктических и меромиктических озер.
- *Термиты* – $20 \text{ Тг} \cdot \text{год}^{-1}$. В желудке этих насекомых сообщество микроорганизмов, способных к глубокой биохимической переработке клетчатки, расщепляет сложные углеводы до более простых соединений, из которых метаногенные археи образуют метан.
- *Пожары* – $40 \text{ Тг} \cdot \text{год}^{-1}$. В процессе горения метан образуется из-за неполного сгорания биологического материала. Основной вклад в выбросы метана вносят пожары в саваннах и тропических лесах.

Поскольку наиболее значимыми естественными источниками метана являются болота, то повышенное внимание исследователями было уделено именно им [Matthews, Fung, 1987; Bartlett, Harriss, 1993; Glagolev, Shnyrev, 2007; Sabrekov et al., 2011]. Тем не менее нельзя недооценивать вклад и других природных источников. Одним из них могут быть избыточно увлажненные леса, т.е. леса, почвы которых находятся в условиях постоянного или временного переувлажнения. Согласно данным Vompersky et al. [2011], заболоченные леса покрывают примерно 13% территории России.

Однако в отличие от болот лесные экосистемы имеют более разнообразные и изменчивые характеристики с точки зрения физико-химических (таких как богатство питательных веществ, кислотность, окислительно-восстановительные условия) и гидрологических факторов (включая периодическое затопление и осушение), что усложняет их изучение. Объем эмиссии метана из данного источника до сих пор находится под вопросом, но представляется, что потоки CH_4 из почв переувлажненных лесов могут быть существенными. Поэтому в последнее время исследователи обратили внимание и на них [Evgrafova et al., 2010; Glagolev et al., 2017; Mochenov et al., 2018; Davidson et al., 2024]. Существуют отдельные работы [Gauci et al., 2024], посвященные поглощению метана деревьями, однако даже с учетом этих факторов мы предполагаем, что избыточно увлажненные леса не могут считаться экосистемами с нулевой эмиссией. Поскольку образование и поглощение метана в почве определяется микробиологическими процессами, оно должно быть подвержено влиянию сезонных колебаний факторов внешней среды. В связи с этим важное значение имеет исследование внутригодовой динамики эмиссии метана. Целью настоящего исследования является рассмотрение избыточно увлажненных лесов как потенциальных источников метана с учетом сезонной изменчивости величины наблюдаемых потоков (на примере смешанного леса в Московской области).

ОБЪЕКТЫ

Измерения проводились в 2019-2022 гг. на участке избыточно увлажненного леса в Рузском районе Московской области, близ пос. Дорохово. Всего было проведено 12 полевых выездов в разные времена года. Летом: 5-24 августа 2019 года, 5-25 июля 2020 года, с 10, 11 и с 29, 30 августа 2021

года. Осенью: 24, 25 октября 2020 года, 9, 10 октября и 6 ноября 2021 года. Зимой: 9 января и 26 февраля 2022 года. Весной: с 8, 9 марта 2022 года (необходимо отметить, что в этот период температура воздуха понижалась до -20°C , так что эти измерения скорее соответствуют зиме), а также 2-4 мая 2022 года [Pyasov et al., 2023]. Ключевой участок ($55^{\circ}34'$ с.ш., $36^{\circ}23'$ в.д.) расположен в 67 км к западу от границы г. Москвы (в 2.25 км на ССЗ от железнодорожной станции Дорохово).

В районе исследования преобладают дерново-подзолистые почвы. Эти почвы формируются в равнинных и горных областях южнотаяжной подзоны под хвойно-лиственными и хвойно-широколиственными мохово-травянистыми и травянистыми лесами преимущественно на суглинистых породах [Shestakov, 2013; Sokolova et al., 1987]. Почвы ключевых участков – дерново-подзолистые глееватые (Umbry-Gleyic Albeluvisols)¹, среднесуглинистые, развитые на покровных среднесуглинистых отложениях (мощность поверхностного органического горизонта до 20-30 см). Эти почвы встречаются в южной таяжной зоне в местах с низким рельефом или на площадных равнинах с плохим дренажем, где временно задерживаются поверхностные воды (верховодки). Они образуются под болотными смешанными мохово-травянистыми лесами на тяжелых грунтах [Sokolova et al., 1987].



Рис. 1. Местоположение:
А) участка измерения относительно г. Москвы;
В) участка Sw_1;
С) всех точек измерения на участке Sw_1.

Fig. 1. Location:
A) of the measurement site relative to Moscow;
B) site Sw_1;
C) of all measurement points on the site Sw_1.

¹ Названия почв даны по Мировой реферативной базе почвенных ресурсов (World reference base – WRB), а также по КиДПР (Классификация и диагностика почв России), 2008.

Растительность представлена смешанным влажнотравным лесом с *Alnus glutinosa*, *Quercus robur*, *Acer platanoides*, *Asarum europaeum*, *Mercurialis perennis*. Расположение точек измерения представлено на Рис. 1.

При выборе конкретных измерительных площадок на исследуемой территории учитывались различия в микрорельефе, существенные для оценки эмиссии метана в условиях значительно различающихся УГВ. На участке Sw_1 была заложена катена (точек измерения потоков CH_4) – Рис. 2.

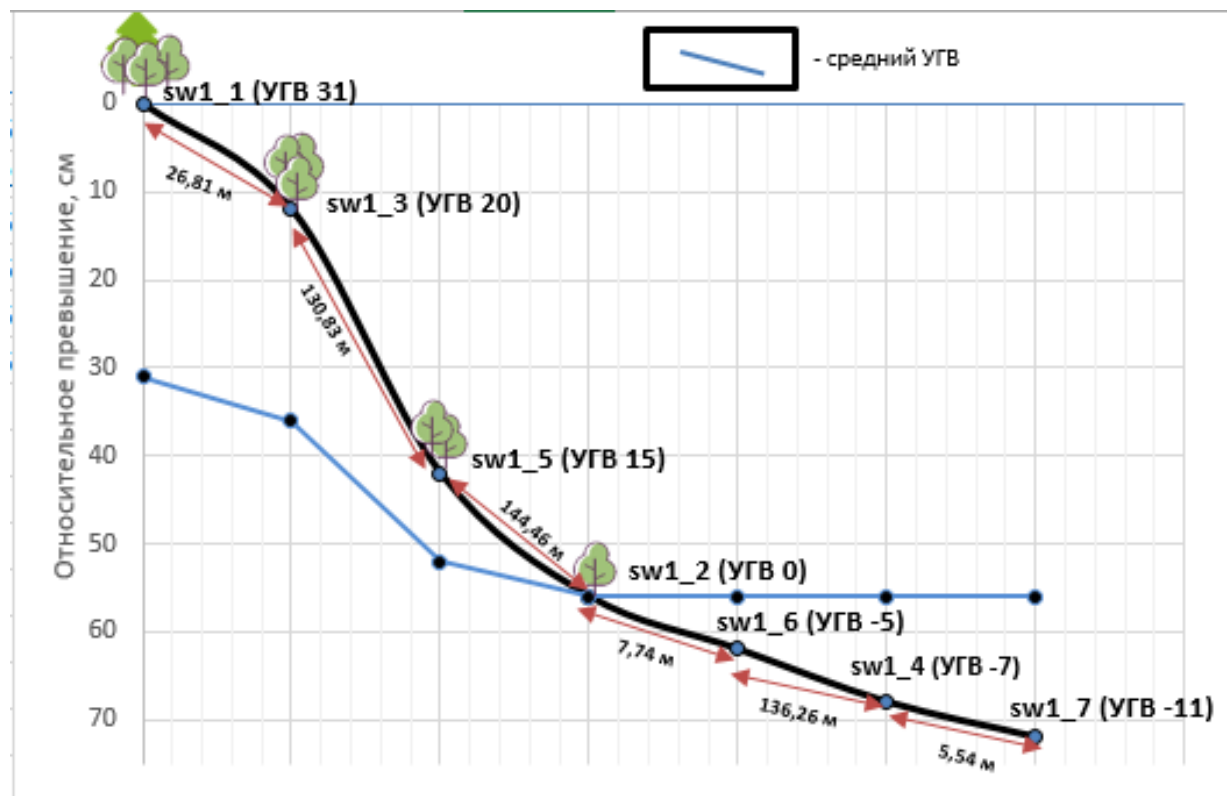


Рис. 2. Катена точек измерения.

УГВ – средний уровень грунтовых вод (в см ниже поверхности почвы, т.е., например, значение УГВ = -5 см означает, что вода стояла в среднем на 5 см **выше** поверхности почвы, а уровень грунтовых вод +15 см означает, что вода стояла на 15 см **ниже** поверхности почвы).

Fig. 2. Transect of measurement points.

GWL – average groundwater level (in cm below the soil surface; for example, a GWL of -5 cm means the water was, on average, 5 cm **above** the soil surface, while a GWL of +15 cm means the water was 15 cm **below** the soil surface).

Данные (для периода полевых работ с 2019 по 2022 год и среднемноголетние – с 1989 по 2018 год) о среднемесечной температуре воздуха (Рис. 3) и сумме осадков (Рис. 4) были получены с метеостанций «Можайск» (индекс ВМО 27509), «Москва ВДНХ» (27612) и усреднены. Многолетняя среднегодовая температура воздуха составила 5.8 °C ($\sigma = 0.7$ °C); в 2019 и в 2020 гг. – соответственно, 7.4 и 7.7 °C (т.е. аномально выше нормы), а в 2021 и 2022 гг. – 6.1 и 6.5 °C (т.е. в пределах нормы). Некоторые периоды отдельных лет характеризовались отклонением от нормы: например, в декабре 2019 г., а также январе и феврале 2020 г. среднемесечная температура была, соответственно, на 5.5, 6.4 и 5.7 °C выше нормы; напротив, февраль 2021 года был на 4.6 °C аномально ниже нормы. Пик летних среднесуточных температур летом 2022 года пришелся на август (аномально превысив норму на 4.0 °C), а в 2019 году – на июнь (выше нормы на 2.3 °C). В основном температуры в годы проведения исследований (за исключением 2021 года) были выше нормы.

Среднемноголетняя годовая сумма осадков составила 688 мм ($\sigma = 116$ мм), а по годам: 2019 г. – 545 мм (ниже нормы на 143 мм), 2020 г. – 842 мм (ниже нормы на 154 мм), 2021 г. – 768 мм и 2022 г. – 735 мм. Крайне влажными были май, июнь и июль 2020 года – суммарно в эти месяцы выпало 468 мм осадков, при среднегодовой норме за этот же период 219 мм (май и июль были аномально влажнее нормы). С июня по август 2022 года выпало суммарно 134 мм осадков.

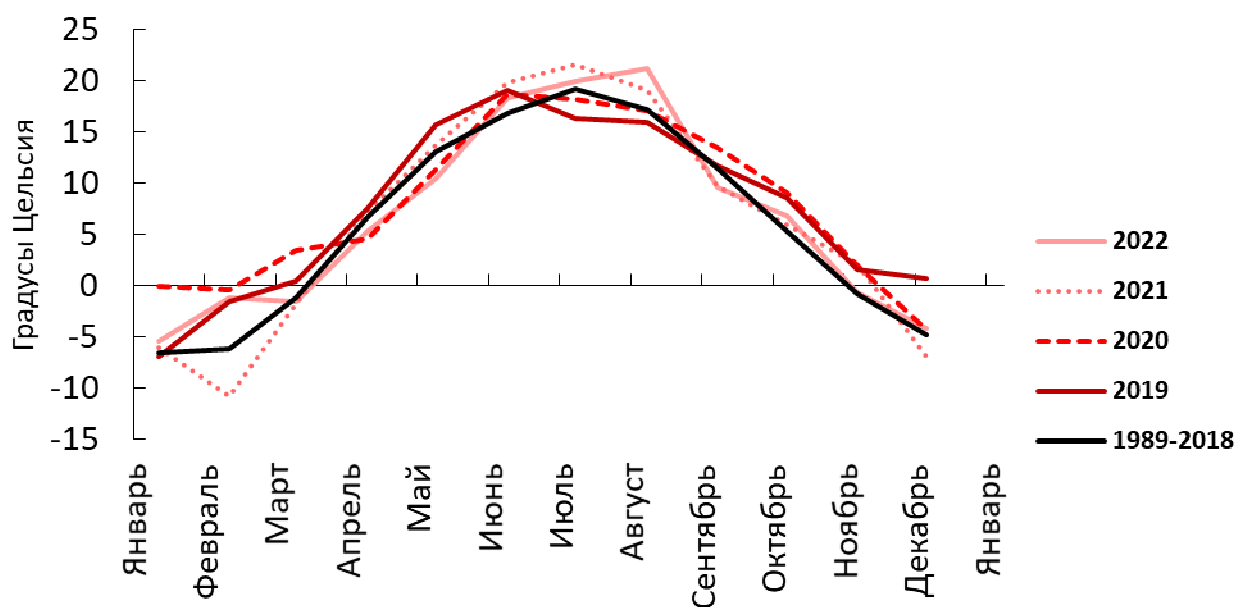


Рис. 3. Среднемесячная температура воздуха по данным метеостанций «Можайск» и «Москва ВДНХ» за 2019-2022 годы в сравнении со среднемноголетними значениями (1989-2018 гг.)

Fig. 3. Average monthly air temperature according to the WMO 27509 and 27612 weather stations for 2019-2022 compared with long-term average values (1989-2018)

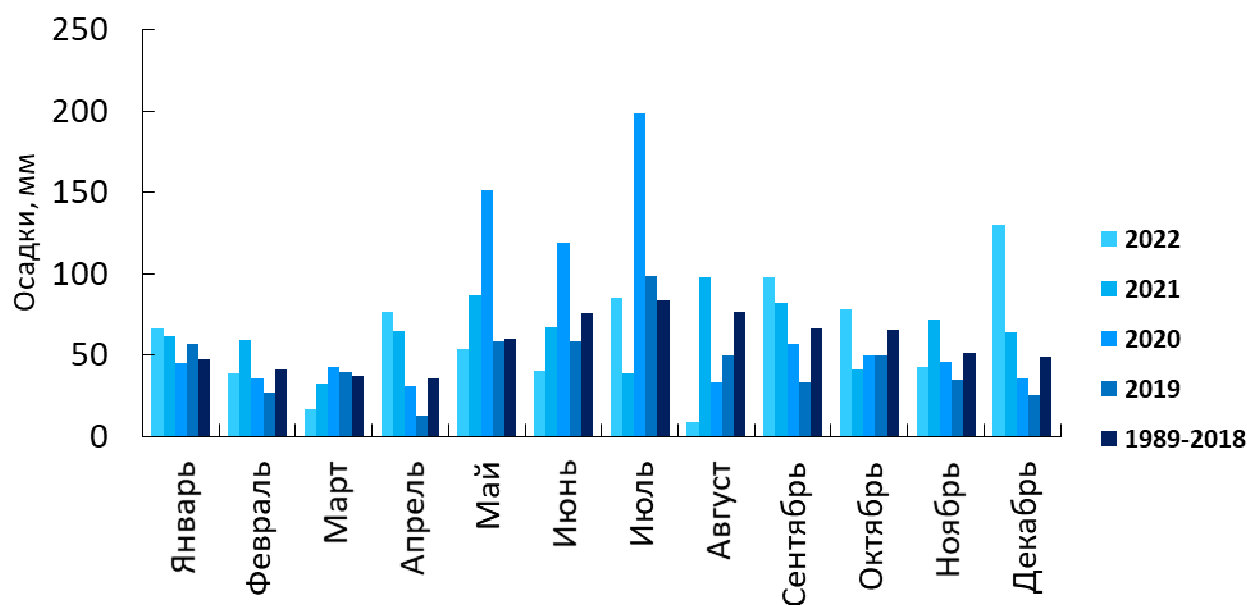


Рис. 4. Среднемесячная сумма осадков по данным метеостанций «Можайск» и «Москва ВДНХ» за 2019-2022 годы в сравнении со среднемноголетними значениями (1989-2018 гг.)

Fig. 4. Average monthly precipitation according to the WMO 27509 and 27612 weather stations for 2019-2022 compared with long-term average values (1989-2018)

МЕТОДЫ

Статический камерный метод

Удельные потоки метана были измерены с помощью статического камерного метода (Рис. 6). Основания из оцинкованной или нержавеющей стали (Рис. 5) врезали в почву не позднее чем за 15 минут до начала измерений (чтобы нивелировать возмущения, возникшие при врезании; зимой основания камер устанавливали непосредственно на снег, стараясь минимизировать повреждение снежного покрова). Затем на основание устанавливали «камеру» (использовали пластмассовые камеры, покрытые солнцезащитной пленкой; объем круглых камер – 0.0168 м^3 ; прямоугольных – 0.0306 м^3 ; трапециевидной – 0.0313 м^3). В пазы основания заливали воду (создавая «гидрозатвор» для обеспечения герметичного контакта камеры и основания) таким образом, чтобы нижняя часть камеры в месте ее контакта с основанием была погружена в воду не менее чем на 2 см. Потом в отверстие в верхней части камеры вставляли резиновую пробку с проходящей через нее пластмассовой трубкой для отбора проб с целью последующего газохроматографического анализа в лаборатории. В случае, когда уровень грунтовых вод был выше уровня почвы, основание ставили в воду, не врезая в почву. В ряде выездов концентрация газа в камере измерялась непосредственно в полевых условиях при помощи газоанализатора (см. ниже); тогда в камеру вставляли две трубки – по одной газ поступал в газоанализатор, а по другой возвращался обратно в камеру (левая панель Рис. 6).



Рис. 5. Основания для камер:
а, б) из оцинкованной стали;
в) из нержавеющей стали

Fig. 5. Collars for chambers:
a, б) made of galvanized steel;
c) made of stainless steel



Рис. 6. Статический камерный метод в действии; слева – газовый анализатор Licor 7810 подключен к камере в форме усеченной пирамиды; справа – камеры не подключены к газоанализатору (отбор проб осуществляется при помощи шприцев)

Fig. 6. The static chamber method in action. On the left, the Licor 7810 gas analyzer is connected to a chamber shaped like a truncated pyramid. On the right, the chambers are not connected to the gas analyzer, and samples are collected using syringes

При измерениях на конкретной точке размещалось от 2 до 4 камер. В них в течение суток производилось от 2 до 19 измерений значений удельных потоков (УП), которые рассматривались в качестве повторностей. Отбор газовых проб для последующего лабораторного анализа концентраций

производили в шприцы (объемом 12 мл) в равноотстоящие моменты времени t_0 , t_1 , t_2 и t_3 . Время экспозиции ($t_3 - t_0$) составляло:

- о 9÷20 минут при уровне стояния воды выше поверхности почвы,
- о 20÷45 минут при уровне воды от поверхности почвы до 15÷25 см ниже нее,
- о 45÷60 минут при уровне воды глубже 25 см.

Со временем в камере происходило изменение концентрации газа, выходящего из почвы или, наоборот, поглощаемого ею. По кривой изменения концентрации вычисляли удельный поток, как описано в [Glagolev et al., 2010].

Анализ концентрации газов

В 2019 г. и летом 2020 г. использовался модифицированный хроматограф «ХПМ-4» («Хроматограф», СССР), оснащенный ПИД (пламенно-ионизационным детектором). В качестве газаносителя применялся водород, подача которого составляла 10 мл/мин. Использовалась колонка диаметром 2.5 мм и длиной 1 м, заполненная сорбентом «Совпол» (80-100 mesh). Температура колонки – 85°C, ввод пробы осуществлялся через петлю объемом 0.132 см³. Осенью 2020 г. измерения велись на хроматографе «АВТОХРОМ» («Манометр», Россия) с ПИД. Диаметр колонки – 2.5 мм, длина – 1 м, температура – 30 °C, газ-носитель – водород, скорость потока – 5 мл/мин. Сорбентом служил «Полисorb» (80-100 mesh). Объем вводимой пробы – 1.5 мл. Каждая проба газа из камеры анализировалась в 3-4 повторностях (т.е. из каждого шприца бралось для анализа от 3 до 4 проб); для расчетов использовалась средняя концентрация. Осенью 2021 г. использовался хроматограф «Кристалл 5000.2» – детектор ПИД, газ-носитель – азот, длина колонок – 3 м, диаметр – 2 мм, сорбент – Porapak (80/100 mesh), температура колонки – 40°C, объем вводимой пробы – 1 см³. Для калибровки хроматографов использовалась смесь воздуха и метана с концентрациями 1.99 ± 0.01 , 5.00 ± 0.01 и 9.84 ± 0.01 ppm CH₄ (National Institute for Environmental Studies, Japan).

Зимой и весной 2022 г. концентрации метана определялись непосредственно в камере при помощи портативного инфракрасного газоанализатора LI-7810 («LI-COR», США). Частота измерений – 1 Гц, объем оптической кюветы – 6.41 см³, скорость потока – 70 мл/мин, температурные пределы измерений – -25 ÷ +40°C, диапазон измерений концентраций метана – от 0 до 100 ppm, погрешность (σ) – не более 0.60 ppb.

Сопутствующие измерения параметров окружающей среды

На измерительных площадках электронными датчиками «THERMOCHRON» iButton DS1922L («DALLAS Semiconductor», США) были измерены температуры почвы на глубинах 0 (T0), 5, 15 (T15) и 45 см, а также атмосферы (Татм) на высоте 2 м над поверхностью почвы. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом, как он описан в [Shein, 2005]. При уровне стояния воды в почве в диапазоне -40 ÷ +50 см отбирали пробы воды, в которых измеряли показатели электропроводности (ЕС) и pH с использованием портативного pH/ЕС-метра Hanna HI-98129 Combo («Hanna Instruments», США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В Табл. 1 приведен ряд показателей вероятностных распределений удельного потока метана на изучаемом участке Sw_1 в 2019-2022 гг. Как мы видим, на этом участке преимущественно наблюдается эмиссия метана. Исключением являются точки Sw_1_1 и Sw_1_3, на которых отмечено небольшое поглощение CH₄. Это объясняется их расположением в рельефе: участки являются наиболее дренированными среди остальных вследствие отдаленности от болота (расположенного на северной окраине заболоченного леса), средний уровень стояния вод в весенне-летне-осенний период составляет 31 и 20 см соответственно (Рис. 2).

Обратимся к графикам сезонного хода УП CH₄ (Рис. 7). На точке Sw_1_1 наблюдалось четкое поглощение метана летом 2019 г., через год было сделано несколько выездов, и с лета 2020 г. по весну 2021 г. на данной точке наблюдался поток, близкий к нулю. В летне-осенний период 2021 г. наблюдался небольшой рост с падением к октябрю. В начале ноября 2021 года в одной из двух пространственных повторностей на участке была отмечена эмиссия CH₄ от 1.77 до 2.62 мгС×м⁻²×ч⁻¹, а во второй – от 0.07 до 0.16 мгС×м⁻²×ч⁻¹.

Таблица 1. Показатели распределения УП CH₄ на участке Sw_1 за весь период наблюдений
Table 1. Descriptive statistics of CH₄ flux in the Sw_1 area for the entire observation period (2019-2022)

Значения УП CH ₄ , мгС×м ⁻² ×ч ⁻¹	Sw_1_1	Sw_1_2	Sw_1_3	Sw_1_4	Sw_1_5	Sw_1_6	Sw_1_7
Минимум	-0.061	0.00	-0.048	0.50	0.014	-0.03	0.42
1 ^й квартиль	-0.014	0.06	-0.017	0.79	0.135	0.29	2.133
Медиана	0.00	0.31	0.012	1.93	0.53	1.36	3.90
3 ^й квартиль	0.051	2.87	0.75	8.07	1.96	7.36	5.78
Максимум	1.15	19.53	1.37	18.29	6.78	16.54	13.41
n	55	58	53	24	55	38	20

Далее по рельефу вниз следует точка Sw_1_3. Здесь наблюдался близкий к нулевому поток метана в течение практически всего года. Осенью на точке Sw_1_3 были зафиксированы отдельные высокие значения потока метана. Например, в ноябре 2021 года в одной из двух пространственных повторностей на участке была отмечена эмиссия метана от 1.90 до 3.53 мгС×м⁻²×ч⁻¹, а во второй – от 0.07 до 0.17 мгС×м⁻²×ч⁻¹.

На точке Sw_1_5, находящейся ниже по склону описанных ранее точек, наблюдалась эмиссия метана с лета 2020 г. по осень 2021 г. В остальное время поток был близким к нулю. На точке Sw_1_2 имело место выделение CH₄ в летне-осенний период 2019 г., а также относительно большие потоки осенью 2021 г. Сезонный ход эмиссии на точке Sw_1_6 отличался большими потоками летом и осенью (около 15 и 13 мгС×м⁻²×ч⁻¹ соответственно). Это была самая низкая точка рельефа с максимальным обводнением (Рис. 2). Точки Sw_1_4 и Sw_1_7 были расположены на одном участке с уровнем грунтовых вод, стабильно в течение всего сезона находившимся выше поверхности почвы (поэтому они были рассмотрены совместно на Рис. 7).

В процессе анализа связи потоков метана (зависимая переменная) с независимыми переменными, в качестве которых выступали WTL, pH, EC, T_{атм}, T₀ и T₁₅, данные были предварительно обобщены путем расчета медианных значений в каждой точке за весь период проведения измерений. Затем была проведена обычная линейная регрессия между потоками метана и каждой из независимых переменных. Удалось выявить достаточно тесную связь медианных УП CH₄ только с WTL ($R^2 = 0.63$), а в остальных случаях коэффициенты $R^2 \leq 0.27$. При этом исходные данные (до расчета медиан) не показали значимой регрессионной зависимости с каким-либо фактором.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим сезонный ход эмиссии метана на точке Sw_1_5, являющейся в некотором смысле «средней» по условиям увлажнения (на точках Sw_1_1 и Sw_1_3 – УГВ стоит глубже, чем на Sw_1_5, а на точках Sw_1_2, Sw_1_6, Sw_1_4, Sw_1_7 – ближе к поверхности почвы). На Sw_1_5 практически всё лето 2020 года поток CH₄ был около нуля. Когда осенью 2020 г. вода стала подниматься вверх по профилю, поток закономерно начал расти. Мы можем наблюдать увеличение эмиссии до апреля 2021 года (из-за отсутствия сильных и продолжительных морозов до февраля). Хорошо известно, что образование метана микроорганизмами в значительной степени определяется температурой (см., например, [Wiegel, 1990; Conrad, 2008; Kirschke et al., 2013]). Из-за теплой осени и начала зимы почва сильно не охлаждалась, а обильный снегопад в феврале 2021 г. сформировал высокий снежный покров (толщиной около 0.5 м), который выполнял роль теплоизолятора. В результате температура почвы (на поверхности) была хоть и низкая, но положительная, что создавало условия для метаногенеза: 8.0°C в октябре, 0.5-1°C в марте и 5.0-5.5°C в апреле.

Обратим внимание на точку Sw_1_6, которая весь осенне-весенний период характеризовалась уровнем стояния воды, близким к поверхности почвы или выше него. Сезонный ход эмиссии CH₄ для данной точки получился наиболее показательным (Рис. 7). Благодаря мониторингу уровня стояния воды на этой точке (Рис. 7) мы можем видеть, что в начале осени 2020 г. вода вышла на поверхность, создавая благоприятные условия для метаногенов. И действительно, начиная с весны 2021 г. наблюдается активная эмиссия CH₄ с поверхности на этой точке.

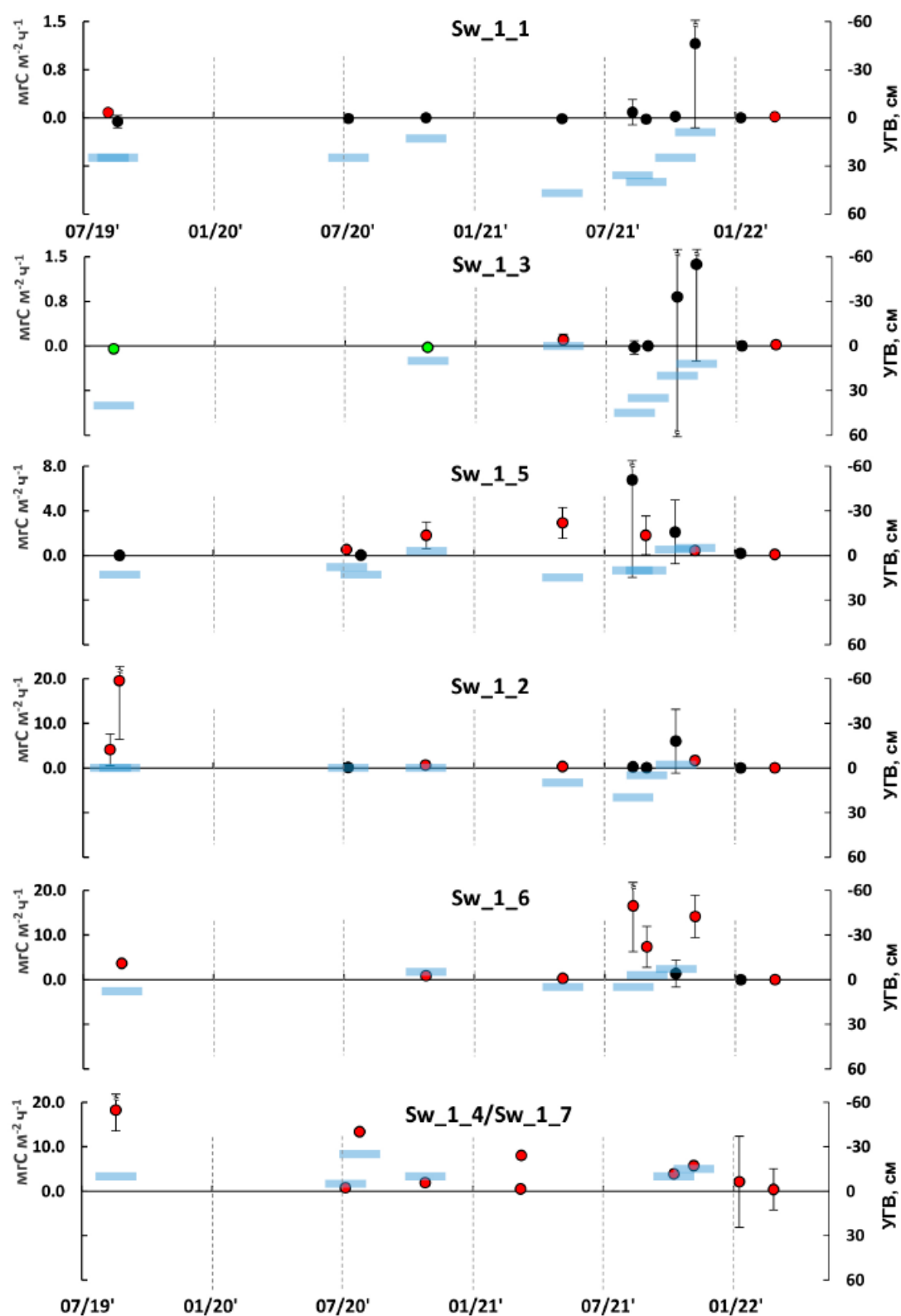


Рис. 7. Сезонный ход потоков метана на исследуемых участках.

Зеленые маркеры – поглощение CH_4 , красные маркеры – выделение CH_4 , черные маркеры – выделение и поглощение CH_4 , голубые блоки – уровень стояния воды, вертикальные отрезки обозначают доверительный интервал.

Fig. 7. Seasonal variations in methane fluxes at the study sites.

Green markers represent CH_4 uptake, red markers represent CH_4 emission, black markers represent CH_4 emission and uptake, blue blocks represent water table, and vertical bars indicate confidence intervals.

Величины УП от минимальных до 1-го квартиля (от -0.061 до -0.014 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$), полученные на расположенных выше в рельефе точках Sw_1_1 и Sw_1_3, близки к типичным значениям потока, наблюдавшегося в автоморфных почвах лиственных лесов шт. Мичиган ($-0.050 \div -0.015$ $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$) [Ambus, Robertson, 2006], соснового леса в шт. Нью-Джерси (-0.047 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$) [Aronson et al., 2012] и лесов в Канаде ($-0.084 \div -0.008$ $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$) [Adamsen, King, 1993], но несколько отличаются от типичных потоков в дренированных почвах лесов Дании ($-0.010 \div -0.004$ $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$) [Ambus, Christensen, 1995]. Впрочем, в последнем случае коэффициент вариации составлял от 265 до 398%. Так что фактически многие значения пересекались с нашим диапазоном. Таким образом, можно сказать, что почвы возвышенных участков изученного нами переувлажненного леса в 25% случаев поглощают метан примерно так же, как автоморфные почвы лесов умеренного и бореального поясов.

Измерений, осуществленных именно в переувлажненных лесах, к настоящему времени выполнено немного (или, строго говоря, *нам известно* не слишком много таких публикаций). Тем не менее некоторое сравнение провести уже можно. В заболоченном сосновом лесу (уровень стояния воды колебался от -5 до $+5$ см) в шт. Нью-Джерси Aronson et al. [2012] в летне-осенний период наблюдали практически нулевые потоки. Данная точка по уровню стояния воды примерно соответствует нашей Sw_1_2, но у нас на данной точке медиана УП составила 0.31 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$. Это даже на порядок больше, чем средний поток (0.031 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$), наблюдавшийся в тропическом переувлажненном лесу в бассейне р. Конго (на точке, не заливаемой водой). На другой точке, которая водой заливалась, средний поток (3.89 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$) [Barthel et al., 2022] удивительным образом соответствовал медиане, полученной на нашей точке Sw_1_7 – см. Табл. 1. Но **максимальные потоки** в тропиках (и на затопляемой, и на незатопляемой точках) существенно превышали (соответственно в 7.7 и в 3.3 раза [Barthel et al., 2022]) максимальное значение, наблюдавшееся нами (19.5 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$ – на Sw_1_2).

Однако измерения Aronson et al. [2012] и тем более Barthel et al. [2022] выполнены гораздо южнее, нежели наши. Поэтому интересно провести сравнение еще и с результатами, опубликованными в [Davidson et al., 2024] и особенно в [Butlers et al., 2023], поскольку они получены в расположенных на широте около 57° с.ш. соответственно заболоченном хвойном лесу в Канаде и в лесах Латвии (ельнике, ольшанике и березняке). По уровню стояния воды в летний период канадские точки примерно соответствуют нашим Sw_1_2 и Sw_1_5 (к сожалению, в цитируемой работе измерения производились лишь в летний период). Удельные потоки метана составляли от 0.17 до 1.6 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$, но обладали существенной вариабельностью (коэффициент вариации – от 150 до 225%). С учетом этого оказывается, что полученные нами величины удельных потоков примерно соответствуют данным Davidson et al. [2024]. В Латвии на неосушенных участках [Butlers et al., 2023] с октября 2019 г. по июнь 2020 г. эмиссия метана в среднем составляла 1.1 ± 1.2 $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$, что примерно соответствует потокам на наших наиболее обводненных точках Sw_1_4 и Sw_1_6 (однако на латвийском участке вода в течение всего периода измерений стояла в среднем на глубине 35 ± 3 см, тогда как у нас – выше поверхности почвы). Наконец, отметим, что в целом типичные величины измеренных нами УП CH_4 вполне сопоставимы с результатами, полученными в изучавшихся несколько лет периодически затопляемых лесах на территории Западной Сибири (ср. с [Glagolev et al., 2017; Glagolev et al., 2018; Mochenov et al., 2018]). Причем если говорить о **летне-осенних** значениях потока, полученных на точке Sw_1_6 ($13-15$ $\text{мгС} \times \text{м}^{-2} \times \text{ч}^{-1}$), то следует отметить, что подобные величины наблюдались также в летне-осенний период даже не в лесах, а на самых активных (с точки зрения эмиссии метана) болотах или внутриболотных озерах в Западной Сибири (ср., например, с [Bohn et al., 2007; Glagolev, Kleptsova, 2009; Davydov et al., 2021; Sabrekov et al., 2022]).

Отдельно обсудим обнаруженную нами корреляцию между эмиссией и УГВ (тесно связанным с влажностью почвы), которая оказалась значима только при обобщении всех результатов измерений по точкам наблюдений путем расчета медиан и не позволила выявить связь потоков с какими-либо факторами без этой подготовки. Во многих работах (см., например, [Moore, Dalva, 1993; Glagolev, 2001; Zona et al., 2009; Mander et al., 2011]) отмечается весьма четкая связь удельного потока CH_4 с уровнем стояния воды в болотах. Но в переувлажненных лесах против ожидания часто² корреляция

² Впрочем, в лесах к настоящему времени выполнено еще относительно мало измерений, поэтому, на наш взгляд, делать какие-то общие выводы еще рано. Справедливости ради отметим, что, например, в [Butlers et al., 2023] была обнаружена весьма высокая корреляция эмиссии CH_4 с уровнем грунтовых вод.

либо была ниже, либо отсутствовала вовсе [Aronson et al., 2012; Davidson et al., 2024]. Причины этого до сих пор неясны. Возможное объяснение можно дать на основе соображений, изложенных в [Glagolev, 2010: p. 114-116] (но там они применены к пространственной вариативности, а здесь мы применим их к временной изменчивости). К настоящему времени широко распространенным описанием воздействия факторов среды на эмиссию является мультипликативная формула: Эмиссия $\sim f_1(\text{Фактор}_1) \cdot f_2(\text{Фактор}_2) \cdot \dots$, где f_1, f_2 – некоторые функции (см., например, [Frolking, Crill, 1994; Cao et al., 1996; Glagolev et al., 1998]). В течение относительно небольшого периода времени, когда мы изучаем зависимость Эмиссии от какого-либо Фактора₁, значения других факторов могут быть относительно постоянными (или, по крайней мере, изменяться не слишком сильно). В частности, пусть изучается влияние уровня воды («Фактор₁») на эмиссию метана в течение месяца. Этот период времени характеризуется не только уровнем воды, но и каким-то количеством метаногенов в почве («Фактор₂»), какой-то температурой почвы в слое обитания метаногенов («Фактор₃») и т.д. Поскольку метаногены размножаются относительно медленно и обитают в основном на таких глубинах, куда температурные волны также проникают с существенным запаздыванием, то в течение месяца можно считать, что $f_2(\text{Фактор}_2) \approx \text{const}_2$, $f_3(\text{Фактор}_3) \approx \text{const}_3$, следовательно, эмиссия будет действительно функцией Фактора₁ и коэффициент корреляции может оказаться относительно высоким. Но, введя в анализ данные еще и по следующему месяцу, характеризующемуся другими значениями биомассы метаногенов и температуры, мы уже не можем принять постоянство величин $f_2(\text{Фактор}_2)$ и $f_3(\text{Фактор}_3)$. Например, пусть вода стояла на некотором Уровне₁ и при этом наблюдалось определенное значение эмиссии. Последующее падение уровня воды ниже тех глубин, на которых обитают метаногены, приведет к гибели значительной их части, поэтому, когда вода опять поднимется до Уровня₁, биомасса метанообразующих микроорганизмов будет совсем другой, и, следовательно, совсем другой будет эмиссия метана. Чем дольше будет время наблюдений, тем сильнее зависимость эмиссии от Фактора₁ «утонет» в шуме остальных факторов, принимающих самые разные значения в разные периоды времени. С другой стороны, в случае агрегированного расчета (например, на основе медиан) мы можем увидеть «взаимную компенсацию» разнонаправленного действия различных факторов и выявления общего тренда связи потоков, например, с УГВ.

Рассмотрев точки измерения, имеющие разное расположение в рельефе, мы можем с уверенностью сказать, что годовой вклад избыточно увлажненных лесов в глобальный бюджет метана требует пристального внимания к данному источнику. Поэтому кратко остановимся на возможных перспективах исследования. Во-первых, необходима точная оценка площади распространения заболоченных лесов [Ilyasov et al., 2023]. Во-вторых, открытым остается вопрос о механизме транспорта метана деревьями и растениями затопленных лесов, пространственной изменчивости потоков метана в различных типах заболоченных лесов, вкладе диффузионного и конвективного переноса метана в минеральных почвах, функционировании сообщества метаногенов в условиях относительно небольшого (в сравнении с органогенными почвами) запаса доступного углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе решения поставленных задач подтверждено, что избыточно увлажненные леса Московской области могут быть источником поступления CH_4 в атмосферу (как это было показано в немногочисленных работах для аналогичных экосистем в других частях планеты).

Условия увлажнения влияют на эмиссию метана в избыточно увлажнённых лесах: чем выше уровень воды в почве, тем больше эмиссия метана (чем выше влажность, тем сильнее анаэробнозис и тем благоприятнее условия для метаногенеза и хуже условия для метанотрофии, следовательно, тем больше эмиссия метана).

Избыточно увлажненные леса являются важным источником метана, который в настоящее время, к сожалению, не учитывается в региональных и глобальных оценках эмиссии. В связи с относительной мягкостью климата Московской области (и шире – Европейской части РФ) эмиссия метана в осенне-зимне-весенний период, вероятно, даёт существенный вклад в его годовой поток.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800146-3 «Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления») и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2022-169) на организацию новой молодежной лаборатории «Лаборатория изучения пространственно-временной изменчивости углеродного баланса лесных и болотных экосистем средней тайги Западной Сибири» в Югорском государственном университете в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

Авторы выражают искреннюю благодарность Моченову С.Ю. и к.б.н. Суворову Г.Г. (Институт лесоведения РАН), оказавших существенную помощь при проведении отдельных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- Adamsen A.P.S., King G.M. 1993. Methane Consumption in Temperate and Subarctic Forest Soils: Rates, Vertical Zonation, and Responses to Water and Nitrogen. *Applied and Environmental Microbiology*, 59(2): 485-490.
- Albritton D.L., Allen M.R., Baede A.P.M., Church J.A., Cubasch U., Xiaosu D., Ehrlert D.H., Folland C.K., Giorgi F., Gregory J.M., Griggs D.J., Haywood J.M., Hewitson B., Houghton J.T., House J.I., Hulme M., Isaksen I., Jaramillo V.J., Jayaraman A., Johnson C.A., Joos F., Joussaume S., Karl T., Karoly D.J., Khesghi H.S., Le Quéré C., Maskell K., Mata L.J., McAvaney B.J., McFarland M., Mearns L.O., Meehl G.A., Meira-Filho L.G., Meleshko V.P., Mitchell J.F.B., Moore B., Mugara R.K., Noguer M., Nyenzi B.S., Oppenheimer M., Penner J.E., Pollonais S., Prather M., Prentice I.C., Ramaswamy V., Ramirez-Rojas A., Raper S.C.B., Salinger M.J., Scholes R.J., Solomon S., Stocker T.F., Stone J.M.R., Stouffer R.J., Trenberth K.E., Wang M.-X., Watson R.T., Yap K.S., Zillman J. 2001. Observed Climate Variability and Change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
- Ambus P., Christensen S. 1995. Spatial and Seasonal Nitrous Oxide and Methane Fluxes in Danish Forest-, Grassland-, and Agroecosystems. *Journal of Environ. Qual.*, 24: 993-1001.
- Ambus P., Robertson G.P. 2006. The effect of increased N deposition on nitrous oxide, methane and carbon dioxide fluxes from unmanaged forest and grassland communities in Michigan. *Biogeochemistry*, 79: 315-337. DOI: 10.1007/s10533-005-5313-x
- Aronson E.L., Vann D.R., Helliker B.R. 2012. Methane flux response to nitrogen amendment in an upland pine forest soil and riparian zone, *J. Geophys. Res.*, 117: G03012. DOI: 10.1029/2012JG001962
- Anderson B., Bartlett K., Frolking S., Hayhoe K., Jenkins J., Salas W. 2010. *Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources*. Office of Atmospheric Programs, US EPA, EPA 430-R-10-001, Washington.
- Barthel M., Bauters M., Baumgartner S., Drake T.W., Bey N.M., Bush G., Boeckx P., Boteffa C.I., Dériaz N., Ekamba G.L., Gallarotti N., Mbayu F.M., Mugula J.K., Makelele I.A., Mbongo C.E., Mohn J., Manda J.Z., Mpambi D.M., Ntaboba L.C., Rukeza M.B., Spencer R.G.M., Summerauer L., Vanlauwe B., Van Oost K., Wolf B., Six J. 2022. Low N₂O and variable CH₄ fluxes from tropical forest soils of the Congo Basin. *Nature Communications*, 13: 330. DOI: 10.1038/s41467-022-27978-6
- Bartlett K.B., Harriss R.C. 1993. Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere*, 26(1-4): 261-320.
- Berdin V.H., Gritsevich I.G., Kokorin A.O., Fedorov Ju.N. 2004. *Greenhouse gases – a global environmental resource: A Reference guide*. World Wide Fund for Nature of Russia, NOPPU, Moscow, 137 pp. (in Russian). [Бердин В.Х., Грицевич И.Г., Кокорин А.О., Федоров Ю.Н. 2004. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс: Справочное пособие. Москва: Всемирный фонд природы России, НОППУ. 137 с.]
- Bohn T.J., Lettenmaier D.P., Sathulur K., Bowling L.C., Podest E., McDonald K.C., Friborg T. 2007. Methane emissions from western Siberian wetlands: heterogeneity and sensitivity to climate change. *Environmental Research Letters*, 2(4): 045015. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045015
- Butlers A., Lazdiņš A., Kalēja S., Purviņa D., Spalva G., Saule G. and Bārdule A. 2023. CH₄ and N₂O Emissions of Undrained and Drained Nutrient-Rich Organic Forest Soil, *Forests*, 14: 1390. DOI: 10.3390/f14071390
- Cao M., Marshall S., Gregson K. 1996. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model. *Journal of Geophysical Research*, 101(D9): 14399-14414.
- Conrad R. 2008. Temperature effects on methanogenic microbial communities. In: *Microbes and the environment: Perspectives and challenges*, (S.J. Liu, H.L. Drake, eds.), pp. 35-40. Science Press, Beijing.
- Davidson S.J., Davies M.A., Wegener E., Claussen S., Schmidt M., Peacock M., Strack M. 2024. Carbon stocks and fluxes from a boreal conifer swamp: Filling a knowledge gap for understanding the boreal C cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129: e2024JG008005. DOI: 10.1029/2024JG008005
- Davydov D.K., Dyachkova A.V., Simonenkov D.V., Fofonov A.V., Maksutov S.S. 2021. Application of the automated chamber method for longterm measurements CO₂ and CH₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 12(1): 5-14.
- Evgrafova S.Yu., Grodnitskaya I.D., Krinitsyn Yu.O., Syrtsov S.N., Masyagina O.V. 2010. Methane emissions from the soil surface in tundra and forest ecosystems of Siberia. *Vestnik KrasGAU*, 12: 80-86 (in Russian). [Евграфова С.Ю., Гродницкая И.Д., Криницын Ю.О., Сырцов С.Н., Масыгина О.В. 2010. Эмиссия метана с поверхности почвы в тундровых и лесных экосистемах Сибири // Вестник КрасГАУ. № 12. С. 80-86].

- Frolking S., Crill P. 1994. Climate controls on temporal variability of methane flux from a poor fen in southeastern New Hampshire: Measurement and modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 8: 385-397.
- Gasche R., Papen H., Rennenberg H. (eds.). 2002. *Trace Gas Exchange in Forest Ecosystems*. Springer, Dordrecht. DOI 10.1007/978-94-015-9856-9.
- Gauci V., Pangala S.R., Shenkin A., Barba J., Bastviken D., Figueiredo V., Malhi Y. 2024. Global atmospheric methane uptake by upland tree woody surfaces. *Nature*. 631: 796-800.
- Glagolev M.V. 2010. Emission of CH₄ from peat soils of Western Siberia: from soil profile to region: Diss. ... Cand. Biol. Sciences. Moscow, 211 pp. (In Russian). [Глаголев М.В. 2010. Эмиссия CH₄ болотными почвами Западной Сибири: от почвенного профиля до региона: дис. ... канд. биол. наук. М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ). 211 с.]
- Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Terentyeva I.E., Sabrekov A.F., Krasnov O.A., Maksyutov S.S. 2017. Methane and carbon dioxide flows in the waterlogged forests of Western Siberian southern and middle taiga subzones. *Optika Atmosfery i Okeana*, 30(4): 301-309 (in Russian). [Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е. Сабреков А.Ф. Краснов О.А. Максютлов Ш.Ш. 2017. Потоки метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 30. № 4. С. 301-309].
- Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Mochenov S.Yu., Maksutov S.S. 2018. Methane and carbon dioxide fluxes in the waterlogged forests of south and middle taiga of Western Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138: 012005.
- Glagolev M., Inisheva L., Lebedev V., Naumov A., Dement'eva T., Golovatskaja E., Erohin V., Shnyrev N., Nozhevnikova A. 2001. The Emission of CO₂ and CH₄ in Geochemically Similar Oligotrophic Landscapes of West Siberia. In: *Proceedings of the Ninth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 2000*, (M. Fukuda, Y. Kobayashi, eds.). Kohsoku Printing Center, Sapporo, pp. 112-119.
- Glagolev M.V., Kleptsova I.E. 2009. Methane emission in the forest-tundra: towards the "standard model" (Aa2) for West Siberia. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 3(81): 77-81 (In Russian). [Глаголев М.В., Клепцова И.Е. 2009. Эмиссия метана в лесотундре: к созданию «стандартной модели» (Aa2) для Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. № 3(81). С. 77-81].
- Glagolev M.V., Panikov N.S., Inoue G. 1998. Modeling of methane emission to atmosphere in West Siberian wetland (Bakchar bog, Tomsk area). In: *Proceedings of Sixth Symposium on the Joint Permafrost Studies between Japan and Russia in 1997* (S. Mori, Y. Kanazawa, Y. Matsuura, G. Inoue, eds.). Isebu, Tsukuba, pp. 175-190.
- Glagolev M.V., Sabrekov A.F. 2012. Determination of gas exchange on the border between ecosystem and atmosphere: Inverse modeling. *Mathematical Biology and Bioinformatics*, 7(1): 81-101 (In Russian). [Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. 2012. Идентификация газообмена на границе экосистема/атмосфера: метод обратной задачи // Математическая биология и биоинформатика. Т. 7. № 1. С. 81-101].
- Glagolev M.V., Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Filippov I.V., Lapshina E.D., Machida T., Maksyutov Sh.Sh. 2012. Methane emission from bogs in the subtaiga of Western Siberia: The development of Standard Model. *Eurasian Soil Science*, 45(10): 947-957. DOI: 10.1134/S106422931210002X
- Glagolev M.V., Shnyrev N.A. 2007. Dynamics of methane emission from natural wetlands in the summer and fall seasons (case study in the south of Tomsk oblast). *Moscow university soil science bulletin*, 62(1): 7-14. DOI: 10.3103/S0147687407010024.
- Haas-Laursen D.E., Harley D.E., Prinn R.C. 1996. Optimizing an inverse method to deduce time-varying emissions of trace gases. *Journal of Geophysical Research*, 101(D17): 22823-22831.
- Hein R., Crutzen P.J., Heimann M. 1997. An inverse modeling approach to investigate the global atmospheric methane cycle. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(1): 43-76.
- Ilyasov D.V., Mochenov S.Y., Rokova A.I., Glagolev M.V., Kupriyanova I.V., Suvorov G.G., Sabrekov A.F., Terentieva I.E. 2023. Moscow region's swamp forests mapping for inventory of CH₄ and CO₂ fluxes. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(2): 116-131. DOI: 10.18822/edgcc568952
- IPCC. 2023. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, (H. Lee, J. Romero, eds.), pp. 1-34. IPCC, Geneva, Switzerland. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Karol I.L., Kiselev A.A. 2004. Atmospheric methane and global climate. *Природа*, 7: 47-52 (in Russian). [Кароль И.Л., Киселев А.А. 2004. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. № 7. С. 47-52].
- Khromov S.P., Mamontova L.I. 1974. *Meteorological Dictionary*. Gidrometeoizdat, Leningrad (in Russian). [Хромов С.П., Мамонтова Л.И. 1974. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат].
- Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J., Dlugokencky E., Bergamaschi P., Bergmann D., Blake D., Bruhwiler L., Cameron-Smith P., Castaldi S., Chevallier F., Feng L., Fraser A., Heimann M., Hodson E., Houweling S., Josse B., Zeng G. 2013. Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6: 813-823. DOI: 10.1038/ngeo1955
- Mander Ü., Maddison M., Soosaar K., Karabelnik K. 2011. The Impact of Pulsing Hydrology and Fluctuating Water Table on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands. *Wetlands*, 31: 1023-1032. DOI: 10.1007/s13157-011-0218-z
- Matthews E., Fung I. 1987. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1: 61-86.
- Mochenov S.Yu., Churkina A.I., Sabrekov S.F., Glagolev M.V., Il'yasov D.V., Terentieva I.E., Maksyutov S.S. 2018. Soils in seasonally flooded forests as methane sources: A case study of West Siberian South taiga. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138(1): 012012.
- Moore T.R., Dalva M. 1993. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. *Journal of Soil Science*, 44: 651-664.
- Pangala S.R., Moore S., Hornibrook E.R.C., Gauci V. 2013. Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands. *New Phytologist*, 197(2): 524-531.
- Purvaja R., Ramesh R., Frenzel P. 2004. Plant mediated methane emission from an Indian mangrove. *Global Change Biology*, 10(11): 1825-1834.

- Rusch H., Rennenberg H. 1998. Black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) trees mediate methane and nitrous oxide emission from the soil to the atmosphere. *Plant and Soil*, 201: 1-7. DOI: 10.1023/A:1004331521059
- Sabrekov A.F., Filippov I.V., Dyukarev E.A., Zarov E.A., Kaverin A.A., Glagolev M.V., Terentieva I.E., Lapshina E.D. 2022. Hot spots of methane emission in West Siberian middle taiga wetlands disturbed by petroleum extraction activities. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(3): 142-155. DOI: 10.18822/edgcc121107
- Sabrekov A.F., Kleptsova I.E., Glagolev M.V., Maksyutov Sh.Sh., Machida T. 2011. Methane emission from middle taiga oligotrophic hollows of Western Siberia. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*, 5(107): 135-143.
- Saunois M., Stavert A.R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J.G., Jackson R.B., Raymond P.A., Dlugokencky E.J., Houweling S., Patra P.K., Ciais P., Arora V.K., Bastviken D., Bergamaschi P., Blake D.R., Brailsford G., Bruhwiler L., Carlson K.M., Carrol M., Castaldi S., Chandra N., Crevoisier C., Crill P.M., Covey K., Curry C.L., Etiope G., Frankenberg C., Gedney N., Hegglin M. I., Höglund-Isaksson L., Hugelius G., Ishizawa M., Ito A., Janssens-Maenhout G., Jensen K.M., Joos F., Kleinen T., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Laruelle G.G., Liu L., Machida T., Maksyutov S., McDonald K.C., McNorton J., Miller P.A., Melton J.R., Morino I., Müller J., Murguia-Flores F., Naik V., Niwa Y., Noce S., O'Doherty S., Parker R.J., Peng C., Peng S., Peters G.P., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Regnier P., Riley W.J., Rosentreter J.A., Segers A., Simpson I.J., Shi H., Smith S.J., Steele L.P., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Tubiello F.N., Tsuruta A., Viovy N., Voulgarakis A., Weber T.S., van Weele M., van der Werf G.R., Weiss R.F., Worthy D., Wunch D., Yin Y., Yoshida Y., Zhang W., Zhang Z., Zhao Y., Zheng B., Zhu Q., Zhu Q., Zhuang Q. 2020. The Global Methane Budget 2000-2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 12: 1561-1623. DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020
- Semenov S.M., Govor I.L., Uvarova N.E. 2018. *The Role of Methane in Modern Climate Change*. IGKE, Moscow, 106 pp. (in Russian). [Семенов С.М., Говор И.Л., Уварова Н.Е. 2018. Роль метана в современном изменении климата. Москва, ИГКЭ. 106 с.]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50262491_34181954.pdf
- Shein E.V. 2005. *Course of Soil Physics*. Publishing House of Moscow State University, Moscow, 432 pp. (in Russian). [Шейн Е.В. 2005. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ. 432 с.].
- Shestakov I.E. 2013. Allocation of valuable soil objects on the territory of perm city within the limits of ecological network. *Anthropogenic transformation of the natural environment*, 1: 86-90. [Electronic resource], available at the link (in Russian). [Shestakov I.E. 2013. выделение ценных почвенных объектов на территории г. Перми в рамках действующей сети ООПТ // Антропогенная трансформация природной среды. № 1. С. 86-90. [Электронный ресурс], доступен по ссылке] URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25284318_17070748.pdf (Дата обращения: [27.12.2023]).
- Sjögersten S., Siegenthaler A., Lopez OR., Aplin P., Turner B., Gauci V. 2019. Methane emissions from tree stems in neotropical peatlands. *New Phytol.*, 225(2): 769-781. DOI: 10.1111/nph.16178
- Sokolova T.A., Shoba S.A., Bgantsev V.N., Urusevskaya I.S. 1987. Profiling and intra-horizon differentiation of clay material in derno-podzolic soils on moraine. *Pochvovedenie*, 6: 38-48. [Соколова Т.А., Шоба С.А., Бганцов В.Н., Урусевская И.С. 1987. Профильная и внутригоризонтальная дифференциация глинистого материала в дерново-подзолистых почвах на морене // Почвоведение. № 6. С. 38-48].
- Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A. 2011. Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 4(7): 734-741
- Warneck P. 1988. *Chemistry of the Natural Atmosphere*. Acad. Press, N.Y. P. 757.
- Wiegel J. 1990. Temperature spans for growth: hypothesis and discussion. *FEMS Microbiology Reviews*. 75: 155-169. DOI: 10.1111/j.1574-6968.1990.tb04092.x
- World Meteorological Organization (WMO). 1994. *Scientific Assessment of Ozone Depletion*. Report № 37.
- Zona D., Oechel W.C., Kochendorfer J., Paw U K.T., Salyuk A.N., Olivas P.C., Oberbauer S.F., Lipson D.A. 2009. Methane fluxes during the initiation of a large-scale water table manipulation experiment in the Alaskan Arctic tundra. *Global Biogeochem. Cycles*, 23: GB2013. DOI: 10.1029/2009GB003487

Поступила в редакцию: 22.11.2023
 Переработанный вариант: 08.12.2025
 Принято в печать: 08.12.2025
 Опубликовано: 17.12.2025