THE INFLUENCE OF THE HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS ON THE CO_2 FLUXES FROM THE OLIGOTROPHIC BOG SURFACE

Kulik A.A.[1*], Zarov E.A.[1]

[1)] *Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

k.artem.a@yandex.ru

Citation: Kulik A.A., Zarov E.A. 2023. The influence of the hydrometeorological factors on the CO_2 fluxes from the oligotrophic bog surface. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 14(4): 249-263.

DOI: 10.18822/edgcc624160

Выполнены измерения чистого экосистемного обмена (NEE) на мочажинном участке грядово-мочажинного комплекса олиготрофного болота «Мухрино» с разделением на составляющие компоненты: валовую первичную продукцию (GPP) и дыхание экосистемы (R_{eco}). Измерения проводились в течение самого тёплого (июль), переходного (сентябрь) и самого холодного (октябрь) месяцев летне-осеннего сезона методом автоматизированных камер с 30-минутным интервалом. Это позволило получить подробную информацию о суточном ходе и сезонной динамике показателей. Для исследованных месяцев по отдельности и полевого сезона в целом осуществлен корреляционный анализ связи между гидрометеорологическими параметрами и величиной потоков. Для дыхания экосистемы (R_{eco}) наиболее высокий уровень корреляции за сезон выявлен с температурой почвы (0.88), температурой воздуха (0.71) и уровнем болотных вод (-0.73); за июль наиболее сильная корреляция выявлена с температурой воздуха (0.70) и температурой почвы (0.68); за сентябрь - с температурой почвы (0.81) и уровнем болотных вод (-0.78); за октябрь – с фотосинтетически активной радиацией (-0.59). Валовая первичная продукция (GPP) сильнее всего коррелирует с фотосинтетически активной радиацией (PAR) — в июле коэффициент корреляции равен -0.95, в сентябре -0.86, в октябре -0.79, в целом за полевой сезон –0.89. Чистый экосистемный обмен (PAR), аналогично GPP, наиболее тесно связан с PAR. В июле коэффициент корреляции NEE и PAR составляет -0.91, в сентябре -0.74, в октябре -0.71, за весь полевой сезон -0.73. Стоит подчеркнуть, что для каждого рассматриваемого месяца влияние внешних факторов на потоки уменьшается с течением времени от июля к октябрю, достигая минимума корреляции в самом холодном месяце.

Ключевые слова: Дыхание экосистемы (R_{eco}); валовая первичная продукция (GPP); чистый экосистемный обмен (NEE); фотосинтетически активная радиация (PAR); LI-8100A; уровень грунтовых вод (WTL); автоматические камеры; Мухрино; болотные экосистемы Западной Сибири; круговорот углерода.

Global climate change is one of the most important and promising phenomena to study in actual time. One of the key causes of global climate change is increasing the greenhouse gas (GHG) concentrations in the atmosphere [IPCC, 2023]. The main greenhouse gases are methane, carbon dioxides and nitric oxide, which contribute to the greenhouse effect and global warming [Lashof, Ahuja, 1990]. Carbon dioxide (CO_2) is one of the most significant and widespread gases involved in the planet's global carbon cycle [Lashof, Ahuja. 1990]. At the same time, living organisms play a key role in creation of atmosphere composition. Autotrophic organisms use a carbon dioxide to build their body structures, including complex organic compounds. During ecosystem functioning, the part of the carbon dioxide is released into the atmosphere through organism respiration, while another part is released through the decomposition of dead organic matter. Carbon dioxide may also be produced through natural and anthropogenic processes.

Peatland ecosystems play a significant role in the planet's carbon cycle, both locally and globally. Peatlands in their natural undisturbed state are a significant long-term carbon sink[1]. However, the process of carbon deposition is not constant – in different years, peatlands may serve either as carbon sink or source[2]. The main factor stimulating the carbon sequestration by peatland ecosystems is climatic conditions [Harenda et al., 2018; Bond-Lamberty et al., 2018]. Peatlands are the second most significant carbon stock on Earth and the largest on land. Despite covering only 2.84% of the Earth's land surface, the amount of soil organic carbon stored in them accounts for about one-third of all soil organic carbon on Earth. Peatlands in the northern hemisphere play a particularly important role in carbon sequestration, with an estimated accumulated carbon quantity of ~473–621 Gt of carbon [Yu et al., 2010].

The largest area of peatlands in Russia is located in Western Siberia, estimated at ~42% of the total Russian area [Vomperskiy et al., 1994; Sheng et al., 2004]. The territory of Western Siberia is featured to a high share of peatlands in original undisturbed state, making them an ideal location to study the impact of global changes on peatland biogeochemical functioning worldwide.

The carbon balance of peatlands is mainly determined by two processes: photosynthesis and respiration [Harenda et al., 2018]. The main factors influencing the CO_2 flux from peatlands are photosynthetically active radiation, atmospheric air temperature (T_{avg}), soil temperature (T_{soil}), and water table level (WTL) [Miao et al., 2013;

Juszczak et al., 2013; Dyukarev et al., 2019]. At the same time, the level of mutual influence and the degree of determination have not yet been fully determined.

To study the carbon balance of terrestrial ecosystems, the chamber method [Davidson et al., 2002] is widely used. The chamber method allows to estimate the CO_2 flux from the surface of the ecosystem. At the same time, the use of the modern automatic system LI-COR LI-8100A (LI-COR, USA) provides high-frequency continuous data on carbon dioxide fluxes over a long period of time, which makes it possible to assess the total accumulation of carbon and significantly improve the reliability of the identified relationships with environmental factors [Zarov et al., 2022].

The purpose of this study was to assess carbon dioxide flluxes and discover the main hydrometeorological parameters that influence the flow in the hollows of the Mukhrino raised bog.

MATERIALS AND METHODS

The research was carried out at the «Mukhrino» field station [Dyukarev et al., 2021], located in the central part of Western Siberia, 30 km southwest of the city of Khanty-Mansiysk. The climate is featured by high repeatability of anticyclonic conditions, rapid changes in weather conditions, a humid, moderately warm summer, and a fairly harsh, snowy winter. The chamber system was installed in a homogeneous area of the peatland, dominated by Sph. balticum, C. limosa, and Scheuchzeria palustris, with the presence of E. vaginatum on the periphery. The plant composition inside the chambers was not determined, but the most homogeneous and similar areas were selected for installation (Figure 2).

Carbon dioxide flux measurements were carried out using the automated chamber method, using a portable soil respiration analysis system LI-8100A (LI-COR, USA). The flues were measured by four automated chambers installed in the raised bog area of Mukhrino (Figure 3). The first group of chambers – NEE (2 LI-COR 8100-104s chambers), measured net ecosystem exchange (NEE); the second group – R_{eco} (2 LI-COR 8100-104 cameras), measured ecosystem respiration (R_{eco}). Measurements were taken for 2 minutes every 30 minutes for all cameras. Wooden walkways were installed in the peatland area to minimize potential negative impacts on the study surface.

The fluxes were calculated using a linear model of specialized software LI-8100 File Viewer 3.0.0 (LI-COR). R programming language packages dplyr [Wickham, 2016], ggplot2 [Wickham, 2016], lubridate [Grolemund, Wickham, 2011] were used for data processing and visualization. To analyze the dynamics of NEE and R_{eco} fluxes, the obtained values were averaged between LI-COR 8100-104s chambers (for NEE) and LI-COR 8100-104 chambers (for R_{eco}). Gross primary production (GPP) was calculated using the equation GPP=NEE-R_{eco} [Connolly et al., 2009]. For further analysis, measurements with a coefficient of determination (R^2) of linear regression above 0.5 were selected to minimize significant noise in the data. Spearman's rank correlation method was chosen to identify dependencies of flux on hydrometeorological properties. The dependence was determined based on the data of the flux and hydrometeorological properties averaged over 30 minutes.

RESULTS AND DISCUSSION

The average daily variation of CO_2 flows for July, September, October 2021 is shown in Fig. 5. The simultaneous use of dark and light chambers allowed to assess the flows that are released in the ecosystem as a result of the respiration of plants, animals and microorganisms (R_{eco}), the intensity of CO_2 absorption in the process photosynthesis (GPP), and net ecosystem exchange (NEE), which is the difference between the specific absorption rate (GPP) of carbon dioxide excretion (R_{eco}). The average daily variation of R_{eco} (Fig. 5) in July was featured by the highest values during daylight hours; the CO_2 flux reaches its maximum value at 11:00 (1.44 μmol $m^{-2}s^{-1}$). For September and October, the daily dynamics of R_{eco} were weakly expressed. The highest CO_2 emissions were typical for evening and night time. The maximum R_{eco} in the daily cycle was observed at 19:00 (0.47 μmol $m^{-2}s^{-1}$) for September, and at 00:00 (0.17 μmol $m^{-2}s^{-1}$) for October. The average daily cycle of GPP (Fig. 5) had a pronounced absorption maximum during daylight hours with maximum radiation, for July – at 11:00 (-3.47 μmol $m^{-2}s^{-1}$), for September – at 12:00 (-1.53 μmol $m^{-2}s^{-1}$), for October – at 11:00 (-0.45 μmol $m^{-2}s^{-1}$). The absorption of carbon dioxide from the atmosphere (GPP) had different daily durations depending on the month (Fig. 5), which is associated with a decrease in daylight hours by autumn. In July, carbon dioxide absorption was observed from 4:00 to 20:00 (16 hours), in September – from 5:00 to 18:00 (13 hours), in October – from 7:00 to 17:00 (10 hours). For the diurnal cycle of NEE (Fig. 5), the CO_2 absorption process (GPP>R_{eco}) predominated in the daytime, while the carbon dioxide emission process (GPP<R_{eco}) dominated at night. The maximum NEE value in the daily cycle in July was estimated at 1.01 μmol $m^{-2}s^{-1}$ at 22:00, in September 0.49 μmol $m^{-2}s^{-1}$ at 20:00, in October 0.17 μmol $m^{-2}s^{-1}$ at 21:00. The minimum NEE value in July was -2.03 μmol $m^{-2}s^{-1}$ at 11:00, in September: -1.01 μmol $m^{-2}s^{-1}$ at 12:00, in October 0.39 μmol $m^{-2}s^{-1}$ at 11:00.

A total of 1711, 2625 and 1597 R_{eco} measurements were taken in July, September and October, respectively. The highest average daily rate of ecosystem respiration R_{eco} occurred in the third ten days of July (July 19); by the last days of October, ecosystem respiration reached its minimum in the annual course (Fig. 7). The average R_{eco} in July was 1.05±0.25 μmol $m^{-2}s^{-1}$, and in October 0.13±0.01 μmol $m^{-2}s^{-1}$. These estimates were obtained on a sufficient array of data and therefore can be considered reliable. The peak intensity of photosynthesis was recorded on July 22, when vegetation absorbed the largest amount of CO_2. After July 22, there was a gradual decline in GPP; the rate of carbon dioxide absorption in the last days of October decreased significantly, but did not drop to zero. The presence of photosynthesis in the hollow of an oligotrophic bog even in late autumn and at low air temperatures is probably due to the activity of sphagnum mosses. Net ecosystem exchange (Fig. 7) was negative every day in July, thereby the

absorption of carbon dioxide from the atmosphere daily dominated its release. In September, ecosystem absorption of carbon dioxide prevailed until September 10, after which both negative and positive NEE values were observed. During this period, intense precipitation occurred, a decrease in air temperature and the amount of incoming radiation, which led to the ecosystem switching from a sink to a temporary source of CO_2. In October, the number of days on which the ecosystem acted as a carbon sink decreased; on most days, carbon dioxide emissions predominated. According to average monthly values, carbon dioxide absorption prevailed in July (-0.53±0.13 μmol $m^{-2}s^{-1}$) and September (-0.11±0.18 μmol $m^{-2}s^{-1}$), in October (0.02±0.04 μmol $m^{-2}s^{-1}$) CO_2 evolution predominated. The number of measurements according to NEE (Table 2) is greatest in September (2584) and least in July (1709).

R_{eco} was most influenced in July (Table 3) by air and soil temperature; in September – soil temperature and marsh water level. In October, when daily temperature variability decreased, the most significant factor for R_{eco} was PAR (-0.59). The degree of correlation of R_{eco} with T_{avg} and T_{soil} in July qualifies as high; these factors are directly related to R_{eco} – the higher the temperature, the greater the release of carbon dioxide into the atmosphere by the ecosystem. This is caused by an increase in the activity of microorganisms under the influence of increased temperature [Nikonova et al., 2019]. In September, the influence of T_{soil} (0.81) and water level (-0.78) increased, while the influence of T_{avg} (0.54) decreased. The degree of correlation of these parameters with R_{eco} in September was classified as high. It is assumed that the strong influence of water level (-0.78) on the R_{eco} flux in September may be associated with a sharp rise in water level (Fig. 6F), which could lead to a disruption of the optimum life activity of microorganisms. Similar flow behavior was found for North American peatlands [Miao et al., 2013]. In October, the greatest influence on R_{eco} was exerted by PAR (-0.59), the degree of correlation is weak negative; At the same time, the correlation of the indicator with PAR in July was weakly positive. The highest correlation for GPP (Table 3) was obtained with photosynthetically active radiation for all months of the study. The PAR correlation level for all months was classified as high. The inverse correlation is due to the fact that as PAR increases, CO_2 absorption increases (negative GPP flux). PAR is a key factor influencing plant photosynthesis, which in turn affects their ability to assimilate CO_2 and produce GPP. As PAR intensity increases, plants increase the rate of photosynthesis and absorb carbon dioxide from the atmosphere faster, which increases GPP. The greatest influence on NEE was caused by PAR (Table 3) in July, in September and October (-0.91, -0.74 and -0.71, respectively). The level of PAR correlation in July and September was high, in October it was moderate. When PAR levels increase, plants use carbon dioxide more actively to produce organic matter and increase the level of GPP in the ecosystem, which leads to an increase in NEE flux. On the other hand, when PAR levels decrease, plants become less active in photosynthesis, which leads to the prevalence of R_{eco} and a decrease in NEE flux. Analysis of correlation coefficients calculated from data for the entire field season, the best relationship for R_{eco} was found with soil temperature (0.88), air temperature (0.71) and water level (-0.73). PAR has the greatest influence on GPP (-0.89) and NEE (-0.73).

CONCLUSIONS

Automated high temporal resolution chamber measurements of carbon dioxide flux provided a data for analyzing CO_2 fluxes in the peatland area. The results provided detailed information that was used to analyze the impact of environmental hydrometeorological parameters on the flux. The highest ecosystem respiration (R_{eco}) value during a 24-hour period was recorded in July at 11:00 (1.44 μmol $m^{-2}s^{-1}$), in September at 19:00 (0.47 μmol $m^{-2}s^{-1}$), and in October at 00:00 (0.17 μmol $m^{-2}s^{-1}$). The maximum gross primary production (GPP) for all months occurred between 11-12 hours: in July at 11:00 (-3.47 μmol $m^{-2}s^{-1}$), in September at 12:00 (-1.53 μmol $m^{-2}s^{-1}$), and in October at 11:00 (-0.45 μmol $m^{-2}s^{-1}$). By autumn, the duration of GPP throughout a day decreased, as well as the amplitude of diurnal variation for all flux indicators. The highest average daily CO_2 flux for all indicators was recorded in July, while the lowest was in October. In net ecosystem exchange (NEE), absorption predominated from July 14 to September 9, with days dominated by ecosystem respiration from September 10 onwards. The amplitude of the average daily flux for all indicators decreased by October.

Based on the Spearman correlation data, the highest seasonal correlation for ecosystem respiration (R_{eco}) was with soil temperature (0.88), air temperature (0.71), and water level (-0.73). In July, the best correlation is with air temperature (0.70) and soil temperature (0.68), in September with soil temperature (0.81) and water level (-0.78), and in October with photosynthetically active radiation (PAR) (-0.59). Gross primary production (GPP) correlates best with PAR. In July, the correlation coefficient is -0.95, in September -0.86, in October -0.79, and for the entire field season -0.89. Net ecosystem exchange (NEE), similar to GPP, is most dependent on PAR. In July, the correlation coefficient is -0.91, in September -0.74, in October -0.71, and for the entire field season -0.73.

In general, the article calculates carbon dioxide fluxes from the surface of a hollow in an oligotrophic peatland. The seasonal and average daily dynamics of hydrometeorological properties are described, and their influence on CO_2 flows is assessed. It is worth noting that throughout the entire growing season, the influence of external factors on fluxes decreases, reaching a minimum mutual correlation in the coldest month (October).

Keywords: Ecosystem Respiration (R_{eco}); Gross Primary Productivity (GPP); Net Ecosystem Exchange (NEE); LI-8100A; Water Table Level (WTL); automatic chambers; Mukhrino; Western Siberian bog; carbon cycle.

ВВЕДЕНИЕ

Современные глобальные климатические изменения являются одним из наиболее важных и значимых явлений на планете, которые требуют углубленного изучения и анализа. Одной из ключевых причин изменений климата является увеличение содержания парниковых газов (GHG) в атмосфере вследствие антропогенной активности [IPCC, 2023]. К основным парниковым газам относятся водяной пар, метан, углекислый газ и закись азота [Lashof, Ahuja, 1990; IPCC, 2023]. Состав атмосферы в значительной степени определяется активностью живых организмов. Так, автотрофы используют углекислый газ атмосферы для синтеза собственной биомассы. В процессе функционирования экосистемы часть углекислого газа возвращается в атмосферу в результате дыхания организмов, а часть – в процессе дыхания редуцентов, участвующих в разложении отмершей органики. При этом CO_2 может образовываться в результате природных и антропогенных процессов.

Современные антропогенные выбросы углекислого газа в основном являются продуктом сжигания различных видов ископаемого топлива, таких как каменный или бурый уголь, природный газ и нефть, а также твердых отходов, древесины и других биологических материалов. Кроме того, CO_2 может выделяться как побочный продукт ряда производственных процессов, например, при производстве цемента. Хозяйственная активность человечества воздействует на углеродный цикл, увеличивая эмиссию диоксида углерода в атмосферу как напрямую, через увеличение выбросов этого парникового газа при промышленном производстве, так и опосредованно, вследствие увеличения площади деградированных экосистем. Альтернативой является связывание CO_2 за счёт восстановления и увеличения площади экосистем-поглотителей [Prentice et al., 2001; Yoro, Daramola, 2020]. Удачным примером восстановления таких экосистем являются работы по рекультивации болот России [Sirin et al., 2021], Германии [Zerbe et al., 2013] и Великобритании [Moxey, Moran, 2014].

Болотные экосистемы играют значимую роль в круговороте С как в региональном, так и в глобальном масштабе [Zemtsov et al., 1998]. Болота в естественном ненарушенном состоянии являются низкопродуктивным стоком углерода (С) с длительным периодом хранения[1]. Процесс депонирования С нестабилен: в разные годы одни и те же болота могут быть как нетто-стоком, так и нетто-источником углерода.

Болотные экосистемы выступают вторыми по запасам углерода на Земле (после океана) и первыми на суше[2]. При малой площади, занимаемой болотами (2.84% от площади поверхности суши), количество почвенного органического углерода, связанного в них, составляет ~1/3 от всего почвенного органического углерода Земли [Xu et al., 2018].

Особую роль в запасании углерода играют бореальные болота северного полушария: накопленное количество С в них оценивается в 473 - 621 Гт С [Yu et al., 2010]. Болотные комплексы Западной Сибири занимают оценочно 42% от общей площади болот России [Vomperskiy et al., 1994; Sheng et al., 2004]. При этом территория Западной Сибири характеризуется высокой долей болотных экосистем в нативном состоянии, что делает её идеальным объектом для изучения влияния глобальных изменений на биогеохимические процессы в болотных экосистемах во всем мире [Zemtsov et al., 1998].

Углеродный баланс наземных экосистем, включая болота, в основном определяется двумя процессами: фотосинтезом и дыханием [Bond-Lamberty et al., 2018; Harenda et al., 2018]. Основными факторами, влияющими на потоки CO_2 в болотных экосистемах, являются солнечная радиация (PAR), температура атмосферного воздуха и почвы, уровень болотных вод (WTL) [Miao et al., 2013; Juszczak et al., 2013; Dyukarev et al., 2019; Makhnykina et al., 2021; Ilyasov et al., 2023]. При этом уровень влияния гидрометеорологических характеристик на интенсивность углеродного обмена и степень детерминации этих связей до сих пор недостаточно изучены.

Для исследования углеродного баланса наземных экосистем широко используется камерный метод, позволяющий оценивать поток CO_2 с поверхности экосистемы [Davidson et al., 2002]. Камерный метод позволяет оценивать поток CO_2 с поверхности экосистемы. При этом, использование современной автоматической системы LI-8100A (LI-COR, США) обеспечивает получение высокочастотных непрерывных данных о потоках углекислого газа в течение длительного

[1] Strack, M. (Ed.). (2008). Peatlands and climate change. IPS, International Peat Society. – Цит. по [Harenda et al., 2018]

[2] Rydin H., Jeglum J. K., Bennett K. D. The biology of peatlands, 2e. – OUP Oxford, 2013. – Цит. по [Harenda et al., 2018]

времени, что позволяет оценить суммарное накопление углерода и существенно улучшить достоверность выявленных зависимостей между потоками CO_2 и факторами окружающей среды [Zarov et al., 2022].

Целью данного исследования является оценка потоков CO_2 и выявление основных гидрометеорологических параметров, оказывающих влияние на эти потоки в мочажинном участке верхового болота Мухрино.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на международном полевом стационаре «Мухрино» [Dyukarev et al., 2021a], расположенном в центральной части Западной Сибири, в 20 км к юго-западу от г. Ханты-Мансийска (ХМАО-Югра) (рис. 1). Климат отличается высокой повторяемостью антициклональных условий, быстрым изменением погодных условий, влажным, умеренно теплым летом и довольно суровой, снежной зимой [Kupriianova et al., 2022].

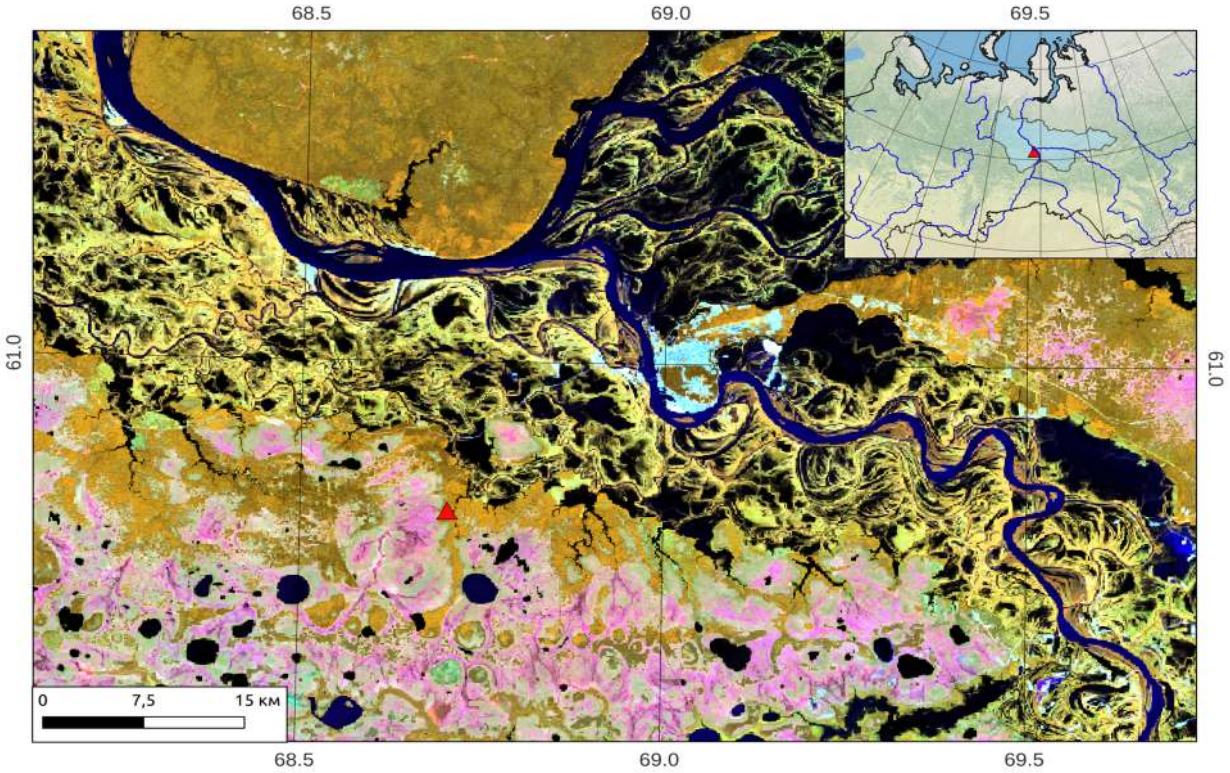


Рисунок 1. Местоположение полевого стационара “Мухрино”. Красным треугольником обозначено расположение научно-полевой станции Мухрино. Снимок Landsat 8 (NASA, США).

Измерение потоков диоксида углерода проводилось в мочажинном участке верхового болота Мухрино, покрытом характерными осоково-шейхцериево-сфагновыми и пушицево-осоково-сфагновыми сообществами. В травяном ярусе доминируют шейхцерия (*Scheuchzeria palustris*), осока (*Carex limosa*), несколько видов пушицы (*Eriophorum russeolum, E. vaginatum*) и росянка (*Drosera rotundifolia, D. anglica*). В моховом покрове доминируют несколько гидрофильных видов сфагновых мхов [Kupriianova et al., 2022]. Камерная система была установлена на однородном участке мочажины (60.893351 с.ш., 68.682618 в.д.) с доминированием *Sph. balticum*, *C. limosa* и *Scheuchzeria palustris* с присутствием кочек пушицы (*E. vaginatum*) по периферии. Растительный покров был представлен максимально однородными и схожими участками (рис. 2).



Рисунок 2. Камера LI-COR 8100-104c, размещенная на мочажинном участке Мухрино.

Измерение потоков CO_2 проводилось при помощи статического камерного метода с использованием портативной автоматической системы LI-8100A (LI-COR, США). Исследования проводились при помощи 4-х автоматических камер: 2-х камер из прозрачного материала (модель LI-COR 8100-104c), предназначенных для измерения чистого экосистемного обмена (NEE, Net Ecosystem Exchange), и еще 2-х – из непрозрачного материала (модель LI-COR 8100-104), измеряющие дыхание экосистемы (R_{eco}, Ecosystem Respiration) (рис. 3). Одновременное использование прозрачных и непрозрачных камер позволило оценить потоки CO_2 в экосистеме в результате дыхания растений, животных и микроорганизмов (R_{eco}), интенсивность поглощения CO_2 в процессе фотосинтеза (GPP), и чистый обмен экосистемы (NEE), который составляет разность между скоростями поглощения (GPP) и выделения углекислого газа (R_{eco}). Для уменьшения потенциального негативного нарушающего воздействия манипуляций на исследуемую поверхность, на мочажинном участке болота были установлены деревянные мостки.

Измерения проводились с 14 июля по 22 октября 2021 г., чтобы охватить период максимальной активности фотосинтеза – вплоть до периода установления стабильного снежного покрова. Время экспозиции для всех камер составляло 2 мин 30 с, с выходом на повторное измерение для каждой камеры раз в 30 мин. Площадь оснований прозрачных и непрозрачных камер составляла 317.8 $см^2$, объем прозрачных камер 3876.0 $см^3$, непрозрачных 4076.1 $см^3$. При обработке результатов полевых измерений были выявлены пропуски. За август пропуски в данных были связаны с нестабильной подачей электроэнергии – из всего ряда значений измерения покрывают менее четверти всего месяца, что не характеризует поток за данный период. Пропуски данных за 21-24 сентября были вызваны низким значением коэффициента детерминации при расчете потоков, что может быть связано с похолоданием и выпадением осадков.



Рисунок 3. Схема расположения камер на мочажинном участке верхового болота Мухрино (NEE – прозрачные камеры; R_{eco} – непрозрачные камеры). (Фото – https://www.youtube.com/watch?v=hwWpGskAkYI).

Расчет потоков производился с помощью линейной модели с использованием специализированного программного обеспечения LI-8100 File Viewer 3.0.0 (LI-COR). Для обработки и визуализации данных использовались пакеты языка программирования R: dplyr [Wickham, 2023], ggplot2 [Wickham, 2016], lubridate [Grolemund, Wickham, 2011]. Для увеличения статистической достоверности результатов измерений полученные значения потоков усреднялись попарно и ежечасно. Для каждого часа в качестве оценки NEE использовалось среднее значение потока в двух прозрачных камерах, полученных в начале и середине часа (0 и 30 мин). Валовая первичная продукция (GPP, Gross Primary Productivity) рассчитывалась по разности потоков, определенных для прозрачных и непрозрачных камер $GPP=NEE-R_{eco}$ [Connolly et al., 2009]. Для дальнейшего анализа были отобраны только те расчеты удельного потока, для которых коэффициент детерминации линейной регрессии изменения концентрации CO_2 в камере был выше 0.5. Такой выбор обусловлен отсутствием значительных шумов в данных измерениях и высоким уровнем соответствия линейной модели зафиксированным значениям концентраций. Для выявления зависимостей потока от гидрометеорологических параметров был выбран метод ранговой корреляции Спирмена ($p=0.05$). Связь потоков CO_2 и гидрометеорологических параметров определялась на основе данных, усредненных за 30 минут.

Гидрометеорологические характеристики были получены с помощью автоматической метеостанции [Dyukarev et al, 2021b]. Перечень параметров и модель измерительных приборов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Перечень параметров и оборудования, использованных в исследовании.

№	Гидрометеорологические характеристики	Наименование датчика	Точность
1	Уровень болотных вод	HOBO U20L-02 (США)	±0.2%
2	Влажность воздуха на высоте 2 м	Rotronic HC2A-S3 (Швейцария)	±0.8%
3	Температура воздуха на высоте 2 м	Rotronic HC2A-S3 (Швейцария)	±0.1°C
4	Температура почвы	Hukseflux STP01 (Нидерланды)	±3%
5	Атмосферное давление	Cambell Scientific CS105 PTB101b (США)	±0.05%
6	Атмосферные осадки	HOBO data logging rain gauge RG3-M (США)	±3%
7	Фотосинтетически активная радиация	LI-COR LI-190R (США)	±5%

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 4 приведен суточный ход основных метеорологических параметров, осредненный для каждого месяца исследований. Для суточного хода температуры воздуха (T_{avg}) (рис. 4A) был характерен минимум в ночные и утренние часы, максимум – в дневные часы. В сентябре суточный ход T_{avg} был более плавным, чем в остальные месяцы, с меньшей амплитудой колебаний в течение суток. В октябре в ночные часы фиксировался переход температуры воздуха через ноль. Минимальная T_{avg} в осредненном суточном ходе в июле была +11.0°C (в 3:00), в сентябре +3.3°C (в 5:00), в октябре -1.1°C (в 7:00). Максимальная T_{avg} в июле составляла +20.5°C (в 15:00), в сентябре +10.1°C (в 15:00), в октябре +3.8°C (в 14:00).

Температура почвы T_{soil} (рис. 4B) характеризовалась минимальными значениями в утренние часы, максимальными в середине дня и снижением температуры к вечеру и ночью. В октябре амплитуда суточного хода температуры почвы снижалась, динамика становилась более «сглаженной», с небольшими колебаниями в течение дня. Минимальные значения T_{soil} в июле принимали +15.4°C (в 6:00), в сентябре +7.7°C (в 9:00), в октябре +3.1°C (в 9:00). Максимальные значения T_{soil} в июле были +20.8°C (в 15:00), в сентябре +11.1°C (в 18:00), в октябре +4.7°C (в 18:00).

Фотосинтетически активная радиация (PAR) (рис. 4C) в июле характеризовалась более высокой интенсивностью радиации в середине дня. В сентябре и октябре уровень радиации снизился. Значения PAR увеличивались в утренние часы и достигали максимума в 11:00-12:00, после чего постепенно уменьшались. Средние значения PAR в полдень для июля составили 821 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$, для сентября 448 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$, для октября 295 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$.

Относительная влажность воздуха (рис. 4D) имела высокие значения в утренние и ночные часы, снижаясь к середине дня. Диапазон колебаний относительной влажности в течение суток в июле изменялся в пределах от 58 до 93 %; в сентябре – от 69 до 95 %; в октябре – от 71 до 91 %.

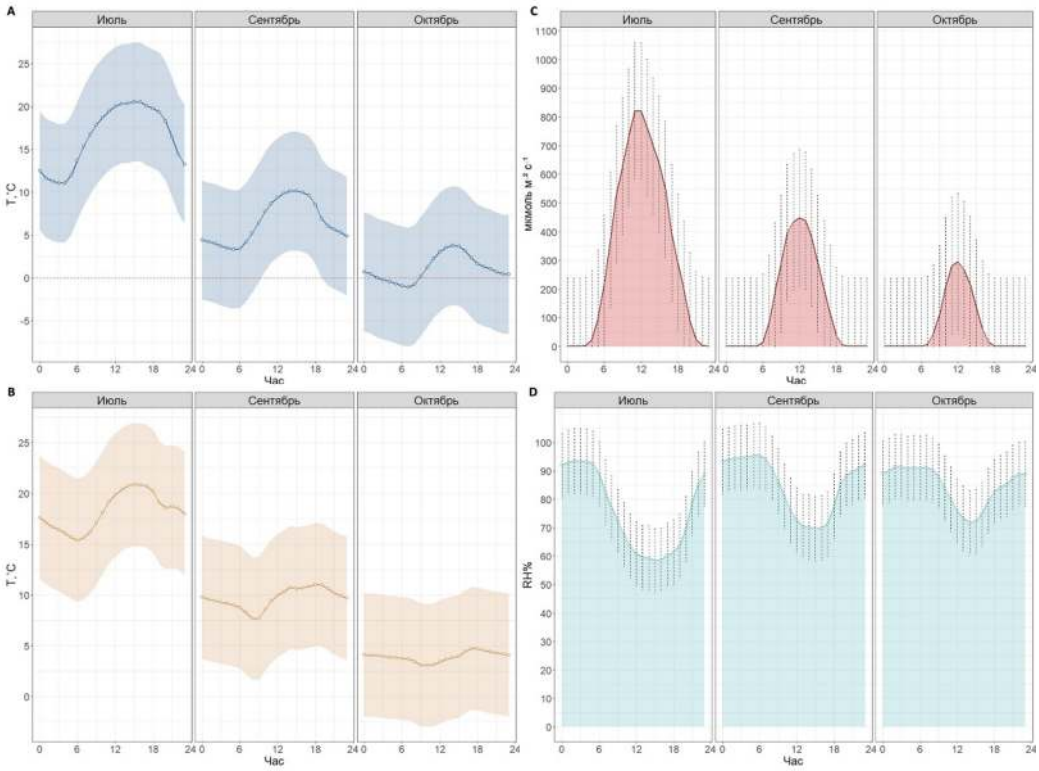


Рисунок 4. Средний суточный ход метеорологических параметров за июль, сентябрь, октябрь 2021 года. A – температура воздуха; B – температура почвы; C – фотосинтетически активная радиация; D – относительная влажность воздуха. Контуром на рисунках A, B и пунктиром на рисунках C, D обозначено стандартное отклонение; красный пунктир на рисунке A обозначает 0 °C.

Средний суточный ход R_{eco} (рис. 5) в июле характеризовался наибольшими значениями в светлое время, максимального значения поток CO_2 достигал в 11:00 (1.44 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$). Для сентября

и октября суточная динамика R_{eco} была слабовыраженной. Наибольшая эмиссия CO_2 была характерна для вечернего и ночного времени. Максимум R_{eco} в суточном ходе наблюдался в 19:00 (0.47 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$) для сентября и в 00:00 (0.17 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$) для октября.

Средний суточный ход GPP (рис. 5) имел выраженный максимум поглощения в светлое время при максимальной радиации, для июля – в 11:00 (-3.47 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), для сентября – в 12:00 (-1.53 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), для октября – в 11:00 (-0.45 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$). Поглощение CO_2 из атмосферы (GPP) в зависимости от месяца характеризовался разной продолжительностью в течение суток (рис. 5), что было связано с сокращением светового дня к осени. В июле поглощение углекислого газа наблюдалось с 4:00 до 20:00 (16 часов), в сентябре – с 5:00 до 18:00 (13 часов), в октябре – с 7:00 до 17:00 (10 часов).

Для суточного хода NEE (рис. 5) в дневное время преобладал процесс поглощения CO_2 ($GPP>R_{eco}$), тогда как в ночное время доминировал процесс эмиссии углекислого газа ($GPP<R_{eco}$). Максимальное значение NEE в суточном ходе в июле было оценено в 1.01 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$ в 22:00, в сентябре 0.49 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$ в 20:00, в октябре 0.17 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$ в 21:00. Минимальное значение NEE в июле составило -2.03 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$ в 11:00, в сентябре: -1.01 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$ в 12:00, в октябре 0.39 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$ в 11:00.

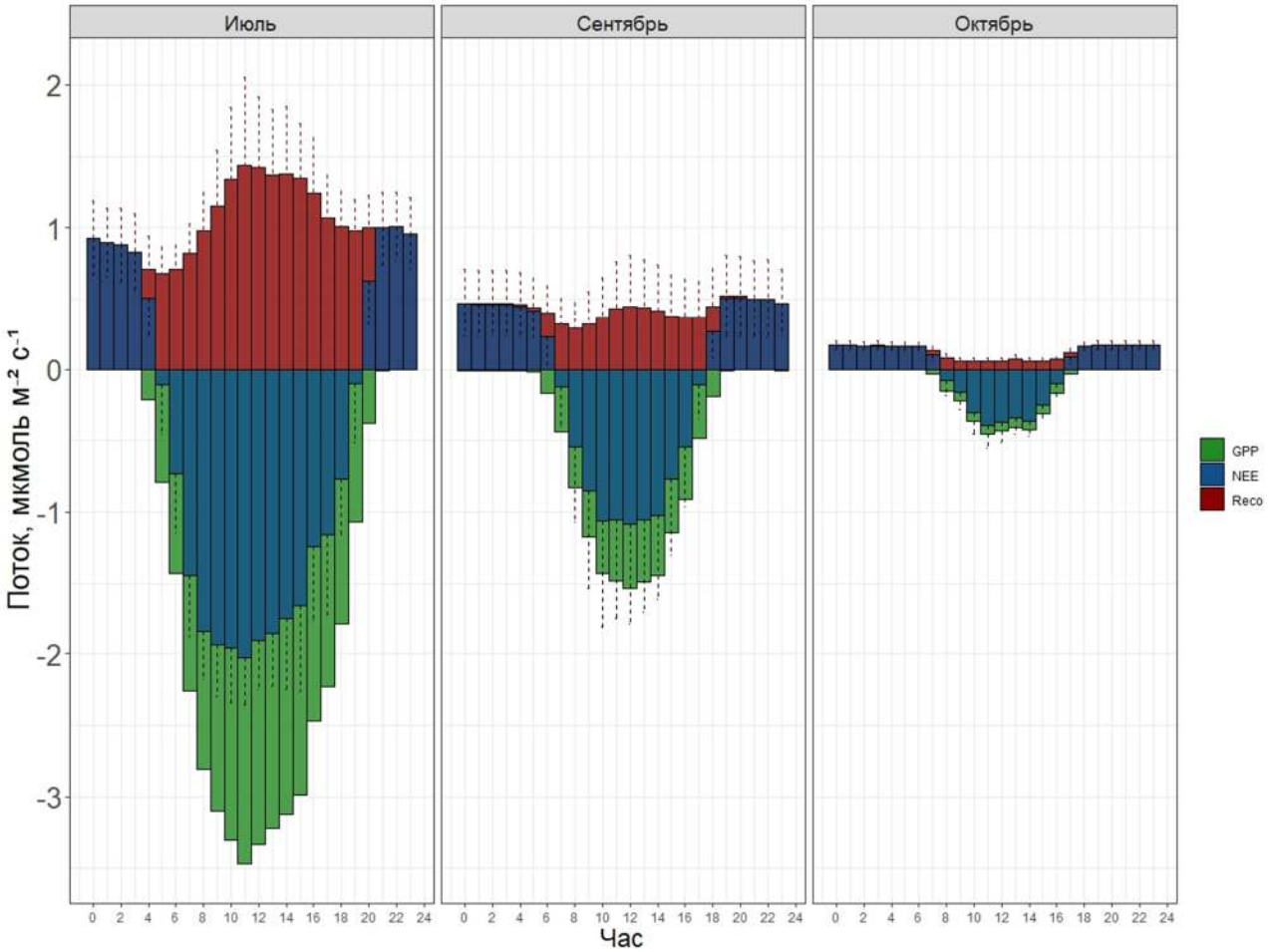


Рисунок 5. Средний суточный ход потоков CO_2 за июль, сентябрь, октябрь 2021 года. Красным пунктиром обозначено стандартное отклонение R_{eco}, черным пунктиром – стандартное отклонение NEE.

Сравнительное изучение сезонной динамики гидрометеорологических характеристик и потоков углекислого газа проводилось по временным рядам средних суточных значений. Средняя суточная температура воздуха и почвы закономерно снижалась с начала июля до конца исследуемого периода (рис. 6A). Положительные средние температуры воздуха наблюдались на протяжении всего периода, за исключением октября. Самая высокая средняя суточная температура воздуха была зафиксирована 1 июля (+26.5°C), а самая низкая – 31 октября (-12.4°C). Наибольшая средняя суточная температура почвы (рис. 6B) была 1 июля (+22.1°C), наименьшая – 31 октября (-1.7°C). Величины PAR также снижались в течение лета и осени: максимальное суточное значение (рис. 6C) пришлось на 8 июля (523 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), минимальное – на 28 октября (21 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$). Диапазон колебаний средней

суточной относительной влажности воздуха (рис. 6D) в июле изменялся в пределах от 61 до 94 %; в сентябре – от 58 до 99 %; в октябре – от 66 до 99 %. Наибольшее количество атмосферных осадков (RA) (рис. 6E) выпало 17 сентября (24.6 мм). В июле было зарегистрировано выпадение осадков в течение 14 сут, в сентябре – 25 сут, а в октябре – 17 сут. В июле WTL постепенно понижался от 6 до 8 см, кратковременно повышаясь на несколько см после дождей. В течение августа WTL также снижался, достигнув минимальных значений 11 см 9 сентября, после чего под влиянием обильных атмосферных осадков (рис. 6D) WTL быстро увеличился, достигнув своего пика на уровне -3 см (уровень воды над поверхностью болота) к 22 сентября. После 22 сентября с установлением сухой прохладной погоды WTL пошёл на спад, достигнув минимума 11 октября (1 см). Динамика атмосферного давления характеризовала синоптическую ситуацию в период исследований и частую смену циклонов и антициклонов, проходящих над регионом исследования (рис. 6G).



Рисунок 6. Средние суточные значения гидрометеорологических параметров для июля, сентября, октября 2021 г. A – температура воздуха; B – температура почвы; C – фотосинтетически активная радиация; D – относительная влажность воздуха; E – сумма атмосферных осадков; F – уровень болотных вод; G – атмосферное давление. Контуром на рисунках A, B, F, G и пунктиром на рисунках C, D обозначено стандартное отклонение; красный пунктир на рисунке A обозначает 0 °C; голубой пунктир на рисунке C обозначает минимальную и максимальную суточную интенсивность PAR.

Всего было проведено 1711, 2625 и 1597 измерений R_{eco} в июле, сентябре и октябре, соответственно (табл. 2). Наибольшая средняя суточная скорость экосистемного дыхания R_{eco} приходилась на третью декаду июля (19 июля), к последним числам октября дыхание экосистемы достигло своего минимума в годовом ходе (рис. 7). Среднее значение R_{eco} в июле составило 1.05±0.25 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$, в сентябре 0.43±0.24 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$, а в октябре 0.13±0.01 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$ (табл. 2).

Пик интенсивности фотосинтеза был зарегистрирован 22 июля, когда растительность поглощала наибольшее количество CO_2 (рис. 7). После 22 июля происходил постепенный спад GPP, скорость поглощения диоксида углерода в последних числах октября существенно снижалась, но не опускалась до нуля. Наличие фотосинтеза на мочажине олиготрофного болота даже поздней осенью и при низких температурах воздуха, вероятно, было обусловлено активностью сфагновых мхов.

Чистый экосистемный обмен (рис. 7) каждые сутки июля был отрицательным, тем самым поглощение углекислого газа из атмосферы ежедневно доминировало над его выделением. В сентябре поглощение экосистемой двуокиси углерода преобладало до 10 сентября, после чего наблюдались как отрицательные, так и положительные значения NEE. В этот период происходило выпадение значительного количества атмосферных осадков, снижение температуры воздуха и интенсивности солнечной радиации, что привело к переключению экосистемы с функции стока во временный источник CO_2. В октябре число дней, когда экосистема выступала в роли стока углерода, уменьшилось; в большинстве дней превалировало выделение углекислого газа. По средним месячным значениям поглощение диоксида углерода превалировало в июле (-0.53±0.13 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$) и сентябре (-0.11±0.18 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), в октябре (0.02±0.04 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$) преобладало выделение CO_2. Максимальное число измерений NEE (табл. 2) было проведено в сентябре (2584), наименьшее – в июле (1709).

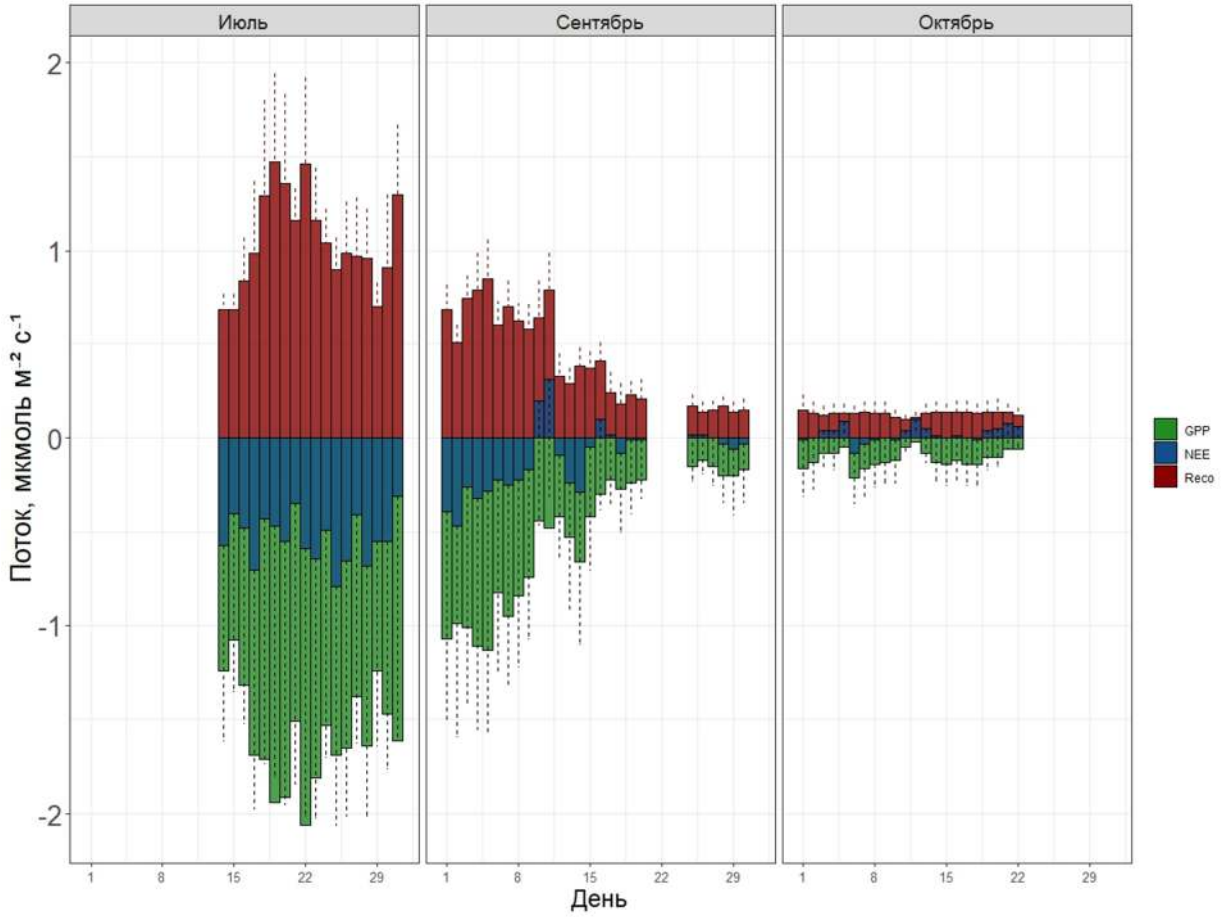


Рисунок 7. Средние суточные потоки CO_2 за июль, сентябрь, октябрь 2021 г. Красным пунктиром обозначено стандартное отклонение R_{eco}, черным пунктиром – стандартное отклонение NEE.

Таблица 2. Статистические характеристики измерений потоков CO_2: число измерений, использованных для осреднения (n), среднее значение (X) ± стандартное отклонение (STD), максимальное (Max), минимальное (Min) среднее суточное значение за месяц. Потоки приведены в мкмоль $м^{-2}с^{-1}$.

	Июль			Сентябрь			Октябрь		
	NEE	R_{eco}	GPP	NEE	R_{eco}	GPP	NEE	R_{eco}	GPP
n	1709	1711	863	2584	2625	1337	1953	1597	1037
X	-0.53	1.05	-1.58	-0.11	0.43	-0.53	0.02	0.13	-0.11
STD	0.13	0.25	0.26	0.18	0.24	0.35	0.04	0.01	0.05
Max	-0.31	1.47	-1.08	0.31	0.85	-0.12	0.10	0.15	-0.02
Min	-0.79	0.68	-2.06	-0.47	0.14	-1.13	-0.08	0.10	-0.21

ОБСУЖДЕНИЕ

Метод корреляции Спирмена позволил определить связь между гидрометеорологическими параметрами и потоками CO_2. Для этого за каждый месяц исследований и за сезон в целом был вычислен коэффициент корреляции между потоками углекислого газа и каждым из гидрометеорологических параметров (табл. 3).

На R_{eco} наибольшее влияние в июле оказывали температура воздуха и почвы (табл. 3); в сентябре – температура почвы и уровень болотных вод. В октябре, когда суточная вариабельность температур снизилась, наиболее значимым фактором для R_{eco} оказался PAR (-0.59). Степень корреляции R_{eco} с T_{avg} и T_{soil} в июле была высокой: чем выше были температуры, тем больше - выделение экосистемой углекислого газа в атмосферу. Это согласуется с известным по литературным данным фактом увеличения активности микроорганизмов при повышении температуры [Nikonova et al., 2019]. В сентябре влияние T_{soil} (0.81) и WTL (-0.78) увеличилось, а влияние T_{avg} (0.54) - уменьшилось. Степень корреляции этих параметров с R_{eco} в сентябре также была высокой. Предполагается, что сильное влияние WTL (-0.79) на поток R_{eco} в сентябре может быть связано с резким подъемом WTL (рис. 6F), который мог привести к нарушению оптимума жизнедеятельности микроорганизмов. Аналогичное поведение потоков было обнаружено для болот Северной Америки [Miao et al., 2013]. В октябре наибольшее влияние на R_{eco} оказывала PAR (-0.59), степень корреляции средняя отрицательная; при этом корреляция показателя с PAR в июле была слабой положительной.

Наибольшая корреляция для GPP (табл. 3) была получена с фотосинтетически активной радиацией для всех месяцев исследования. Уровень корреляции GPP с PAR за все месяцы квалифицировался как высокий. Обратная корреляция обусловлена тем, что с увлечением PAR растёт поглощение CO_2 (отрицательный поток GPP). PAR является ключевым фактором, влияющим на фотосинтез растений, который, в свою очередь, влияет на их способность ассимилировать CO_2 и производить GPP. При увеличении интенсивности PAR, растения увеличивают скорость фотосинтеза и быстрее связывают углекислый газ из атмосферы, что увеличивает GPP.

Наибольшее влияние на NEE в июле, в сентябре и октябре оказывала PAR (-0.91, -0.74 и -0.71 соответственно) (табл. 3). Уровень корреляции с PAR в июле был очень высоким, а в сентябре и октябре – высоким. Когда PAR увеличивается, растения активнее используют углекислый газ для синтеза органического вещества, и величины GPP возрастают, что приводит к увеличению отрицательного потока NEE. С другой стороны, когда уровень PAR снижается, растения становятся менее активными в процессе фотосинтеза, что приводит к превалированию R_{eco} и увеличению положительного потока NEE.

Расчет коэффициентов корреляции по данным за весь полевой сезон показывает, что наилучшая связь для R_{eco} выявлена с температурой почвы (0.88), температурой воздуха (0.71) и WTL (-0.73). Наибольшее влияние на GPP (-0.89) и NEE (-0.73) оказывала PAR.

Таблица 3. Корреляция Спирмена (p=0.05): связь потоков углекислого газа и гидрометеорологических факторов. Температура воздуха (T_{avg}), температура почвы (T_{soil}), фотосинтетически активная радиация (PAR), атмосферные осадки (RA), влажность воздуха (RH), атмосферное давление (AP), уровень болотных вод (WTL), число использованных для корреляции значений потоков (n).

Коэффициент корреляции Спирмена (ρ=0.05)								
	T_{avg}	T_{soil}	PAR	RA	RH	AP	WTL	n
Июль								
R_{eco}	0.70	0.68	0.38	-0.06	-0.42	-0.12	-0.41	1711
GPP	-0.59	-0.34	-0.95	0.11	0.66	-0.01	0.23	863
NEE	-0.47	-0.23	-0.91	0.13	0.66	-0.04	0.16	1709
Сентябрь								
R_{eco}	0.54	0.81	-0.04	-0.09	-0.12	-0.36	-0.78	2625
GPP	-0.48	-0.19	-0.86	0.02	0.43	0.09	0.22	1337
NEE	-0.23	0.11	-0.74	-0.01	0.39	-0.11	-0.07	2584
Октябрь								
R_{eco}	-0.08	0.31	-0.59	-0.03	0.25	-0.11	0.03	1597
GPP	-0.35	0.1	-0.8	-0.03	0.36	0.01	-0.08	1037
NEE	-0.22	0.23	-0.71	-0.03	0.32	-0.07	0.02	1953
За полевой сезон								
R_{eco}	0.71	0.88	0.23	0.03	-0.23	-0.52	-0.73	5933
GPP	-0.57	-0.41	-0.89	0.01	0.48	0.23	0.33	3237
NEE	-0.28	-0.05	-0.73	0.05	0.51	-0.03	0.04	6246

ВЫВОДЫ

Автоматические камерные измерения потоков углекислого газа с высоким временным разрешением (каждые 30 мин), предоставили долговременный достоверный набор данных для анализа потоков CO_2 на мочажинном участке олиготрофного болота Мухрино. Результаты мониторинга были использованы для анализа влияния гидрометеорологических параметров на потоки диоксида углерода.

Наибольшее значение дыхания экосистемы (R_{eco}) в суточном ходе, осредненном для июля, было получено в 11:00 (1.44 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), для сентября – в 19:00 (0.47 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), для октября – в 00:00 (0.17 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$). Максимум валовой первичной продукции (GPP) за все месяцы наблюдался в диапазоне 11:00-12:00: в июле – в 11:00 (-3.47 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), в сентябре – в 12:00 (-1.53 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$), в октябре – в 11:00 (-0.45 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$). К осени уменьшилась продолжительность периода с ненулевыми значениями потока GPP в течение дня, а также амплитуда суточного хода. Наибольшее значение среднего суточного потока CO_2 для всех показателей было в июле, наименьшее – в октябре. В чистом экосистемном обмене (NEE) поглощение превалировало с 14 июля до 9 сентября. Начиная с 10 сентября встречаются дни, где доминировало дыхание экосистемы.

По результатам корреляционного анализа обнаружено, что наилучшая связь за сезон для дыхания экосистемы (R_{eco}) проявляется с температурой почвы (0.88), температурой воздуха (0.71) и уровнем болотных вод (-0.73), что обусловлено формированием оптимальных условий для жизнедеятельности микроорганизмов, формирующих поток гетеротрофного дыхания. В июле наилучшая корреляция R_{eco} наблюдалась с температурой воздуха (0.70) и температурой почвы (0.68), в сентябре – с температурой почвы (0.81) и уровнем болотных вод (-0.78), в октябре – с фотосинтетически активной радиацией (-0.59). Валовая первичная продукция (GPP) лучше всего коррелировала с фотосинтетически активной радиацией (PAR) во все месяцы. В июле коэффициент корреляции GPP с PAR был равен -0.95, в сентябре -0.86, в октябре -0.79, за полевой сезон -0.89. Чистый экосистемный обмен (NEE), аналогично GPP, был наиболее зависим от PAR. В июле

коэффициент корреляции составлял -0.91, в сентябре -0.74, в октябре -0.71, а за весь полевой сезон -0.73.

В данном исследовании нами были рассчитаны потоки углекислого газа с поверхности мочажины на олиготрофном болоте, описаны сезонная и среднесуточная динамики гидрометеорологических показателей, а также проведена количественная оценка их влияния на потоки CO_2. Наиболее ярко выраженной закономерностью было постепенное уменьшение влияния гидрометеорологических факторов на потоки CO_2 в ходе нашего мониторингового эксперимента, достигая минимума корреляции в самом холодном месяце (октябре).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта «Наука». Соглашение № 94-ДОН/05.5/20-ЮГУ-231 от 14.12.2020.

This research has been supported by the Government of the Tyumen region within the framework of the Program of the World-Class West Siberian Interregional Scientific and Educational Center (national project “Nauka”).

Выражаем искреннюю благодарность за помощь в проведении исследований ведущему инженеру Алексею Дмитриченко, а также Ивану Дубинскому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bond-Lamberty B., Bailey V.L., Chen M., Gough C.M., Vargas R. 2018. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. *Nature*, 560(7716): 80-83. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0358-x

Connolly J., Roulet N.T., Seaquist J.W., Holden N.M., Lafleur P.M., Humphreys E.R., Heumann B.W., Ward S.M. 2009. Using MODIS derived fPAR with ground based flux tower measurements to derive the light use efficiency for two Canadian peatlands. *Biogeosciences*, 6(2): 225-234. https://doi.org/10.5194/bg-6-225-2009

Davidson E.A., Savage K.V.L.V., Verchot L.V., Navarro R. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4): 21-37. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00100-4

Dyukarev E.A., Godovnikov E.A., Karpov D.V., Kurakov S.A., Lapshina E.D., Filippov I.V., Filippova N.V., Zarov E.A. 2019. Net Ecosystem Exchange, Gross Primary Production And Ecosystem Respiration In Ridge-Hollow Complex At Mukhrino Bog. *Geography, Environment, Sustainability*, 12(2): 227-244. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-77

Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Filippov I., Bleuten W., Khoroshavin V., Ganasevich G., Meshcheryakova A., Vesala T., Lapshina E. 2021a. The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia: the Mukhrino bog case study. *Land*, 10(8): 824. https://doi.org/10.3390/land10080824

Dyukarev E., Filippova N., Karpov D., Shnyrev N., Zarov E., Filippov I., Voropay N., Avilov V., Artamonov A., Lapshina E. 2021b. Hydrometeorological dataset of West Siberian boreal peatland: a 10-year record from the Mukhrino field station. *Earth System Science Data*, 13(6): 2595-2605. https://doi.org/10.5194/essd-13-2595-2021

Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. 2012. The influence of environmental factors on the CO_2 emission from the surface of oligotrophic peat soils in West Siberia. *Eurasian Soil Sc*., 45: 588–597. https://doi.org/10.1134/S106422931206004X

Grolemund G., Wickham H. 2011. Dates and Times Made Easy with lubridate. Journal of Statistical Software, 40(3): 1-25. https://doi.org/10.18637/jss.v040.i03

Harenda K.M., Lamentowicz M., Samson M., Chojnicki B.H. 2018. The role of peatlands and their carbon storagefunction in the context of climate change. *Interdisciplinary Approaches for Sustainable Development Goals*, (Tymon Zielinski, Iwona Sagan, Waldemar Surosz, eds.), pp. 169–187, Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71788-3_12

Ilyasov D.V., Meshcheryakova A.V., Glagolev M.V., Kupriianova I.V., Kaverin A.A., Sabrekov A.F., Kulyabin M.F., Lapshina E.D. 2023. Field-Layer Vegetation and Water Table Level as a Proxy of CO_2 Exchange in the West Siberian Boreal Bog. *Land*, 12: 566. https://doi.org/10.3390/land12030566

IPCC. (eds. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero). 2023. 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. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Juszczak R., Humphreys E., Acosta M., Michalak-Galczewska M., Kayzer D., Olejnik J. 2013. Ecosystem respiration in a heterogeneous temperate peatland and its sensitivity to peat temperature and water table depth. *Plant Soil*, 366: 505-520. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1441-y

Kupriianova I.V., Kaverin A.A., Filippov I.V., Ilyasov D.V., Lapshina E.D., Logunova E.V., Kulyabin M.F. 2022. The main physical and geographical characteristics of the Mukhrino field station area and its surroundings. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(4): 215-252. doi: 10.18822/edgcc240049

Lashof D., Ahuja D. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, 344: 529-531. https://doi.org/10.1038/344529a0

Makhnykina A.V., Polosukhina D.A., Kolosov R.A., Prokushkin A.S. 2021. Seasonal dynamics of CO_2 emissions from the surface of a Central Siberian raised bog. *Geosfernye issledovaniya*, 5:85-93. (in Russian). [Махныкина А.В., Полосухина Д.А.,

Колосов Р.А., Прокушкин А.С. 2021. Сезонная динамика эмиссии CO_2 с поверхности верхового болота Центральной Сибири // Геосферные исследования. №4. С. 85-93]. DOI: 10.17223/25421379/21/7

Miao G., Noormets A., Domec J.C., Trettin C. C., McNulty S.G., Sun G., King J.S. 2013. The effect of water table fluctuation on soil respiration in a lower coastal plain forested wetland in the southeastern US. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4): 1748-1762. https://doi.org/10.1002/2013JG002354

Moxey A., Moran D. 2014. UK peatland restoration: Some economic arithmetic. *Science of the Total Environment*, 484: 114-120. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.033

Nikonova L.G., Kurganova I.N., Ovidovich L.D.G.V., Zhmurin V.A., Golovatskaya E.A. 2019. Influence of abiotic factors on the decomposition of plant litter in peat-forming plants in an incubation experiment. *Bulletin of Tomsk State University. Biology*, 46: 148-170. (in Russian). [Никонова Л.Г., Курганова И.Н., Овидиович Л.Д.Г.В., Жмурин В.А., Головацкая, Е.А. 2019. Влияние абиотических факторов на разложение опада растений-торфообразователей в инкубационном эксперименте // Вестник Томского государственного университета. Биология, №46. С. 148-170].

Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D., Dubinin P. 2004. A high resolution GIS based inventory of the west Siberian peat carbon pool. *Global Biogeochem Cycles*, 18(3): 1-14. https://doi.org/10.1029/2003GB002190

Sirin A.A, Medvedeva M., Korotkov V., Itkin V., Minayeva T., Ilyasov D., Suvorov G., Joosten H. 2021. Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting. *Land*, 10(11): 1200. https://doi.org/10.3390/land10111200

Vomperskiy S.E., Ivanov A.I., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Glukhova T.V., Dubinin A.I., Glukhov A.I., Markelova L.G. 1994. Organic soils and bogs of Russia and carbon stock in their peat. *Pochvoveden'ye*, 12: 17-25. (in Russian). [Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г. 1994. Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. №12. С. 17-25].

Wickham H., Franois R., Henry L., Miller K., Vaughan D. 2023. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4, https://github.com/tidyverse/dplyr, https://dplyr.tidyverse.org

Wickham H. 2016. Data Analysis. In: ggplot2. Use R! Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_9

Xu J., Morris P.J., Liu J., Holden J. 2018. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *Catena*, 160: 134-140. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.010

Yu Z., Loisel J., Brosseau D. P., Beilman D.W., Hunt S.J. 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical research letters*, 37(13). https://doi.org/10.1029/2010GL043584

Zarov E.A., Jacotot A., Kulik A.A., Gogo S.S., Lapshina E.D., Dyukarev E.A. 2022. The carbon dioxide fluxes at the open-top chambers experiment on the ombrotrophic bog (Mukhrino field station). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(4): 194-201. doi: 10.18822/edgcc168830

Zemtsov A.A., Mezentsev A.V., Inisheva L.I. 1998. Peatlands of Western Siberia: their role in the biosphere. Tomsk: TGU, SibNIIT, 72 pp. (in Russian). [Земцов, А. А., Мезенцев, А. В., и Инишева, Л. И. 1998. Болота Западной Сибири: их роль в биосфере. Томск: ТГУ, СибНИИТ. 72 с.].

Zerbe S., Steffenhagen P., Parakenings K., Timmermann, T., Frick A., Gelbrecht J., Zak D. 2013. Ecosystem Service Restoration after 10 Years of Rewetting Peatlands in NE Germany. *Environmental Management*, 51: 1194–1209. https://doi.org/10.1007/s00267-013-0048-2

Поступила в редакцию: 04.12.23
Переработанный вариант: 30.12.2023