# EFFECTS OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION ANOMALIES ON CARBON DIOXIDE AND LATENT HEAT FLUXES IN WETLAND ECOSYSTEMS

Satosina E.<sup>1,2\*</sup>, Gushchina D.<sup>1</sup>, Tarasova M.<sup>1</sup>, Gibadullin R.<sup>1</sup>, Zheleznova I.<sup>1</sup>, Emelianova E.<sup>2</sup>, Osipov A.<sup>1</sup>, Olchev A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии

<sup>2</sup> Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, лаборатория экологоклиматических исследований

\*lisan.sat@gmail.com

**Citation:** Satosina E., Gushchina D., Tarasova M., Gibadullin R., Zheleznova I., Emelianova E., Osipov A., Olchev A.V. 2024. Effects of temperature and precipitation anomalies on carbon dioxide and latent heat fluxes in wetland ecosystems. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(3): 189-199.

#### DOI: 10.18822/edgcc635041

В рамках данного исследования проведена оценка возможных отличий в отклике болотных экосистем умеренных и полярных широт, расположенных на различных континентах, на экстремальные явления погоды (аномально высокие/низкие температуры, засухи/интенсивные осадки и др.). Влияние экстремальных явлений погоды на изменчивость потоков CO<sub>2</sub> и скрытого тепла (LE) в различных болотных экосистемах оценивалось с помощью метеорологических данных реанализа ERA5, а также данных о потоках CO2 и LE с 15 станций мониторинга потоков парниковых газов из глобальной сети FLUXNET. Анализ реакции потоков CO<sub>2</sub> и LE на экстремальные температуры и осадки показал, что отклик болотных экосистем в умеренных и полярных широтах может различаться в зависимости от географического положения, региональных климатических условий, структуры растительного покрова, а также от интенсивности аномалий температуры и осадков. Если в умеренных широтах в течение теплого периода во время экстремально высоких температур наблюдалась преобладающая положительная аномалия потока СО2 (превышение эмиссии над поглощением СО2), то в полярных широтах отмечался противоположный отклик – увеличение нетто поглощения СО2 болотными экосистемами. Мгновенный отклик на интенсивные осадки во всех рассматриваемых болотных экосистемах был идентичным и проявлялся в виде усиления эмиссии (положительной аномалии) СО<sub>2</sub> в атмосферу. Экстремально высокие значения температуры сопровождались положительными аномалиями LE из-за интенсификации процессов испарения с повышением температуры. Подобный эффект наблюдался во всех исследуемых болотных экосистемах. Кумулятивный эффект от экстремально высоких осадков характеризуется преобладанием эмиссии СО<sub>2</sub> над поглощением как в болотных экосистемах умеренных широт, так и в отдельных экосистемах, расположенных в полярных широтах. Отсутствие осадков на протяжении нескольких недель сильно не сказывалось на потоках СО2 и сопровождалось для большинства исследуемых болотных экосистем доминирующими отрицательными аномалиями потока CO<sub>2</sub> (усиление поглощения CO<sub>2</sub>).

*Ключевые слова:* болотные экосистемы, аномалии температуры и осадков, потоки углекислого газа, реанализ, база данных FLUXNET.

This study conducted a comprehensive assessment of the response of wetland ecosystems in temperate and polar latitudes, located on different continents, to extreme weather events. These events included temperature anomalies (unusually high/low temperatures) and precipitation anomalies (droughts/intense precipitation). The analysis of the response net ecosystem exchange (NEE) of  $CO_2$  and latent heat (LE) fluxes to extreme temperature and precipitation events used ERA5 reanalysis data [Smith, 2011] and observations of  $CO_2$  and LE fluxes from the global FLUXNET database [https://fluxnet.org/data/]. Fifteen greenhouse gas flux monitoring stations were selected for the study, representing the longest and most continuous time series of observations. These stations are located on different continents, with eight stations in temperate latitudes and seven in polar regions. It should be noted that this study focused exclusively on the warm season. The beginning and end of the warm season were defined as the sustained crossing of the daily mean air temperature above 0°C for at least seven consecutive days.

For each station, daily anomalies of  $CO_2$  and LE fluxes were calculated as the deviation from the long-term mean values for the corresponding day of the year. Extremely high/low values of flux anomalies were identified as exceeding one standard deviation from the overall time series for each calendar month individually.

To identify periods with extreme air temperature values, ERA5 reanalysis data on two-meter air temperature every 3 hours with a spatial resolution of  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  from 1991 to 2021 were used. To estimate extreme precipitation amounts, data from half-hourly station observations were used. Daily means were calculated from these data in a first

step. Thresholds for defining extremely hot/cold periods were calculated as daily mean air temperature exceeding the 95th percentile (for anomalously hot periods) or not exceeding the 5th percentile (for anomalously cold periods) of a normal distribution with mean and standard deviation. The distribution was constructed for a specific month of the year and then averaged over the entire period considered. Two approaches were used to determine the extreme precipitation threshold. In the first approach, extreme precipitation days were defined as days with daily precipitation exceeding the 95th percentile of the probability density function (the Weibull distribution was used for precipitation). The second approach was based on the assessment of the Antecedent Precipitation Index (API), which determines the cumulative effect of precipitation on  $CO_2$  fluxes.

For the quantitative assessment of the relationship between temperature and precipitation extremes and flux anomalies, the percentages of days on which both the NEE/LE anomaly exceeded the standard deviation and the temperature/precipitation exceeded the 95th percentile for the upper threshold or the temperature did not reach the 5th percentile for the lower threshold were calculated. The percentage was calculated based on the total number of days when one of the characteristics (air temperature, daily sum of precipitation) exceeded the threshold.

The analysis showed that temperate and polar wetland ecosystems can respond differently to temperature and precipitation anomalies. These differences can be attributed to the geographic location of the ecosystem, regional climatic conditions, plant species composition, and the intensity of temperature and precipitation extremes. During the warm half of the year, periods of extremely high temperatures in temperate latitudes were associated with a positive  $CO_2$  flux anomaly, corresponding to an increased emission of  $CO_2$  into the atmosphere. In contrast, polar latitudes showed an opposite response - an increase in  $CO_2$  uptake by wetland ecosystems under anomalously high temperatures. This opposite response of  $CO_2$  fluxes may be related to the different soil moisture regimes in polar wetland ecosystems and the different plant species composition. Extremely high temperatures were accompanied by positive LE anomalies due to the intensification of evaporation processes with rising temperatures, a trend observed in all wetland ecosystems analyzed.

The immediate response of wetland ecosystems to intense precipitation (above the 95th percentile) was manifested as an increase in CO<sub>2</sub> flux to the atmosphere at almost all stations analyzed. This observed response could be related to the "Birch effect" [Birch, 1964], which is characterized by an intensification of soil respiration due to a sudden increase in soil moisture and, consequently, an increase in the rate of decomposition and mineralization of organic matter during heavy precipitation and rising groundwater levels. LE flux decreases during intense precipitation, indicating suppression of evaporation due to high humidity and reduced incoming solar radiation. The cumulative effect (API index) of extremely high precipitation is characterized by a predominance of extremely positive CO<sub>2</sub> flux anomalies over negative ones in wetland ecosystems at both temperate and polar latitudes. It should also be noted that the percentage of days with increased CO<sub>2</sub> uptake during the two weeks following intense precipitation is significantly higher than for the immediate response (10-25% of days in temperate latitudes and 5-20% of days in polar latitudes). The increase in CO<sub>2</sub> uptake after heavy precipitation may be related to enhanced photosynthetic rates of the vegetation cover under sunny weather and optimal soil moisture conditions. A prolonged absence of precipitation, represented by extremely low API values, is accompanied by negative CO<sub>2</sub> flux anomalies (enhanced uptake) at most of the studied wetland ecosystem stations, indicating a high adaptive potential of the studied wetland ecosystems to short-term (less than 14 days) dry periods. On the other hand, enhanced CO<sub>2</sub> uptake could be facilitated by clear weather conditions, which prevail during dry periods and are accompanied by an increase in direct solar radiation and corresponding acceleration of photosynthetic processes.

It is noteworthy that flux anomalies often did not coincide with temperature or precipitation extremes, indicating that the functioning of wetland ecosystems is strongly influenced by multiple abiotic and biotic factors, which vary among different plant communities.

*Key words:* permanent wetlands, temperature and precipitation anomalies, Net Ecosystem Exchange (NEE) of CO<sub>2</sub>, latent heat flux, FLUXNET database, reanalysis.

#### Используемые сокращения:

LE – скрытый поток тепла или затраты тепла на испарение (latent heat flux); NEE – нетто экосистемный обмен CO<sub>2</sub> (net ecosystem exchange); GPP – валовая первичная продукция; API – Antecedent Precipitation Index; Q – квантиль; CKO или STD – стандартное отклонение.

# ВВЕДЕНИЕ

Изменения в современном климате, характеризующиеся резким ростом глобальной температуры, изменением режима осадков, а также увеличением количества и интенсивности опасных явлений погоды, оказывают активное воздействие на рост, развитие и устойчивость растительных сообществ [Ciais et al., 2005; Ummenhofer et al., 2017; IPCC, 2021]. Экстремальные

явления погоды, такие как волны жары, катастрофические засухи, ураганы и интенсивные ливни, могут привести к нарушению состояния и функционирования природных экосистем и растительных сообществ, изменению скорости транспирации, фотосинтеза, дыхания растений и почвы, нетто экосистемного обмена  $CO_2$  (NEE) между растительностью и атмосферой [Frank et al., 2015; Kramer et al., 2020; Ritter et al., 2020; Zhang et al., 2022].

Одними из наиболее уязвимых типов наземных экосистем на планете к воздействию экстремальных явлений погоды можно считать болотные экосистемы, покрывающие около 2.8% всей земной поверхности [Xu et al., 2018]. Они, как и остальные наземные экосистемы, активно регулируют процессы обмена энергией, водяным паром, диоксидом углерода (СО<sub>2</sub>) между подстилающей поверхностью и атмосферой, выполняя важную водорегулирующую функцию, формируя радиационный и тепловой баланс земной поверхности, определяя микроклимат обширных территорий и поглощая и удерживая атмосферный углерод в связанном состоянии на протяжении значительных интервалов времени [Dinsmore et al., 2013; Scharlemann et al., 2014; FAO, 2020]. Существует много типов болот, расположенных в разных климатических условиях и отличающихся по характеру питающих вод, положению в рельефе и другим факторам. Болота расположены практически во всех природных зонах Северного полушария, однако наиболее широко болота распространены в бореальной и субарктической зоне. Основной функцией болотных экосистем является накопление органического материала – торфа, который образуется в результате неполного разложения мертвых остатков растений в условиях постоянного избытка влаги. Таким образом, болота являются одним из важнейших резервуаров углерода на планете, играя важнейшую роль в поддержании баланса парниковых газов в атмосфере [Oechel et al., 1993; Sirin et al., 2008; Post et al., 20091.

Вопрос влияния экстремальных явлений погоды на разные типы болотных экосистем в условиях меняющегося климата исследован пока достаточно слабо. Исследования влияния аномально жарких/холодных, а также сухих/избыточно влажных периодов на функционирование болотных экосистем и на изменчивость в этих экосистемах потоков парниковых газов и испарения проводился в последние годы в основном на примере отдельных болотных экосистем [Gill et al., 2017; Park et al., 2021; Mamkin et al., 2023], с применением преимущественно качественных подходов без использования жестких критериев для классификации аномалий метеорологических параметров и потоков, а также и без их дальнейшего обобщения. Очевидно, что в подобных исследованиях важно не только выявить и оценить общие тенденции изменения потоков CO<sub>2</sub>, испарения на изменения факторов внешней среды, но также важно и провести количественную оценку и интерпретацию выявленных закономерностей. Это является залогом для лучшего понимания механизмов функционирования болотных экосистем, а также для возможности более точного прогнозирования их отклика на воздействие внешних факторов.

Целью данного исследования являлось проведение количественной оценки и выявление возможных отличий в отклике NEE и затрат тепла на испарение (LE) болотных экосистем умеренных и полярных широт, расположенных на различных континентах, на экстремальные погодные явления (значительные положительные и отрицательные аномалии температуры воздуха и осадков) с использованием глобальной базы данных FLUXNET и данных реанализа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа временной и пространственной изменчивости NEE и LE были отобраны экспериментальные данные, полученные с помощью метода турбулентных пульсаций (eddy covariance) [Aubinet et al., 2012] с 15 станций мониторинга парниковых газов из глобальной базы данных FLUXNET (https://fluxnet.org/data/), которые представляли собой наиболее продолжительные и непрерывные ряды наблюдений. Станции располагались на разных континентах: 8 мониторинговых станций в умеренных широтах и 7 – в полярных (Puc. 1) (список станций см. в Табл. П1). Все выбранные для исследования станции, согласно классификации IGBP [Belward et al., 1999], относятся к водно-болотным угодьям. Метеорологические условия на станциях анализировались с использованием данных станционных наблюдений и данных реанализа Европейского центра прогнозов погоды ERA5 [Smith, 2011]. Следует отметить, что в данном исследовании рассматривался только тёплый период года. Начало и конец теплого сезона определялись как устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 0°С на протяжении не менее семи последовательных дней.



*Рис.* 1. Станции глобальной сети мониторинга FLUXNET, отобранные для анализа влияния экстремальных погодных условий на потоки CO<sub>2</sub>.

Fig. 1 The FLUXNET stations selected for the analysis of the  $CO_2$  flux response to extreme weather conditions.

Анализ и расчет потоков CO<sub>2</sub> и LE проводился в соответствии с общепринятыми рекомендациям международного сообщества с использованием стандартизированного программного обеспечения [Aubinet et al., 2012; Fratini, Mauder, 2014]. Пропуски, вызванные сбоями в работе оборудования и электропитания, слабой турбулентностью, сильными осадками и т.д., для всех выбранных станций были заполнены при помощи программного пакета ReddyProc [Wutzler et al., 2018] и алгоритмов описанных [Reichstein et al., 2005]. Среднесуточные значения потоков рассчитывались путем осреднения восстановленных 30-минутных рядов данных.

Для каждой станции рассчитывались среднесуточные аномалии потоков CO<sub>2</sub> и LE как разность измеренных среднесуточных значений потоков для соответствующего дня года и их среднемесячных значений за весь имеющийся период наблюдений. Экстремально высокие (низкие) аномалии потоков CO<sub>2</sub> были определены как превышающие ±1 СКО временного ряда для каждого отдельного месяца.

Для выделения периодов с экстремальными значениями температуры воздуха использовались данные реанализа ERA5 по температуре воздуха на уровне двух метров за каждые 3 часа с пространственным разрешением 0,25°×0,25° с 1991 по 2021 год. Для выделения периодов и дней с экстремально высокими осадками использовались данные станционных наблюдений с получасовым разрешением. По этим данным на первом этапе были рассчитаны среднесуточные значения. Пороговые значения для определения экстремально жарких/холодных периодов рассчитывались как превышение среднесуточного значения температуры воздуха 95% квантиля (для аномально жарких периодов) или непревышение 5% квантиля (для аномально холодных периодов) нормального распределения [Zheleznova, Gushchina, 2023]. Распределение строилось для конкретного месяца года и затем усреднялось за весь период 1991-2021 гг. для каждого конкретного месяца. Для определения порога экстремальных осадков были использованы два подхода. В первом подходе дни с экстремально обильными осадками были определены как дни с суточным количеством осадков, превышающим 95% квантиль функции плотности вероятности (для осадков применялось распределение Вейбулла). Второй подход был основан на оценке индекса API (Antecedent Precipitation Index или Индекс предшествующих осадков), который определяет кумулятивный эффект выпавших осадков на потоки CO<sub>2</sub> и LE [Gushchina et al., 2023]. Индекс рассчитывался согласно формуле [Li et al., 2021]:

$$API = \sum_{t=1}^{M} P_t k^t$$

где  $P_t$  – количество осадков, выпавшее в течение дня t (где t – номер дня, изменяющийся от 1 до M); M – число дней, для которых рассчитывается накопленная сумма осадков, а k – параметр, характеризующий снижение вклада выпавших осадков в текущее влагосодержание корнеобитаемого слоя почвы с течением времени. В данном исследовании было принято M равным 14 дням, а k равно 0,8.

Значение API, превышающее одно стандартное отклонение для временного ряда, на каждой мониторинговой станции считалось экстремально высоким. Для минимизации воздействия сезонных колебаний стандартное отклонение вычислялось отдельно для каждого месяца. Критерием для определения экстремально низкого значения API служило значение, не превышающее 5% от общей амплитуды временного ряда. Амплитуда определялась как средняя разность между максимальным и минимальным средними значениями API за каждый месяц, рассчитанная на основе данных с 1991 по 2021 год. Использование порога в одно стандартное отклонение невозможно для оценки низких значений API, поскольку стандартное отклонение может превышать среднемесячное значение API, делая значения ниже минус одного стандартного отклонения теоретически невозможными для измерения количества осадков.

Для количественной оценки взаимосвязи между экстремумами температуры и осадков и аномалиями потоков были рассчитаны проценты дней, когда одновременно аномалия NEE/LE превышала стандартное отклонение и температура/осадки превышали 95% квантиль для верхнего порога или температура не достигала 5% квантиля для нижнего порога. Процент рассчитывался исходя из общего количества дней, в течение которых одна из характеристик (температура воздуха, суточная сумма осадков) превышала пороговое значение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ отклика потоков на экстремальные погодные условия выявил высокое разнообразие реакций NEE и LE в болотных экосистемах как в умеренных, так и в полярных широтах. В течение теплого полугодия в периоды экстремально высоких температур (превышающих 95% квантиль) в умеренных широтах наблюдалась положительная аномалия NEE, соответствующая усилению эмиссии СО<sub>2</sub> в атмосферу. В течение 18-44% дней с аномально высокими температурами отмечались положительные аномалии NEE, превышающие 1 СКО (Рис. 2А, красные столбцы). Это может быть обусловлено как возможным уменьшением скорости фотосинтеза и снижением валовой первичной продукции (GPP) в болотных экосистемах при аномально высоких температурах, так и ростом экосистемного дыхания (RE) [Anjileli et al., 2021]. В полярных широтах наблюдался противоположный отклик – увеличение поглощения СО2 болотными экосистемами при аномально высоких температурах (16-44% дней) (Рис. 3А, синие столбцы). В данном случае противоположный отклик NEE может быть связан с отличиями в режиме увлажнения почвы в болотных экосистемах полярных широт, а также различиями в адаптационных механизмах к высоким температурам воздуха у разных растительных сообществ. Также поглощение СО<sub>2</sub> в данном случае может быть связано с температурным режимом полярных широт: температуры выше 95% квантиля в этих регионах соответствуют температурам, благоприятным для интенсификации фотосинтеза (при достаточном увлажнении), при этом растительность в большинстве случаев не испытывает теплового стресса.

Отклик NEE на отрицательные аномалии температуры в теплое время года значительно варьирует между экосистемами в пределах одного биома в зависимости от географического положения, характеристик ландшафта и видового состава растительности (Рис. 2Б и 3Б) [Charrier et al., 2021].



*Рис.* 2. Процент дней с аномалиями потоков CO<sub>2</sub> (NEE) и LE, превышающими 1 стандартное отклонение (STD), возникающими одновременно с экстремально высокими (А) и экстремально низкими (Б) температурами в болотных экосистемах умеренных широт.

*Fig.* 2. The percentage of days when  $CO_2$  flux anomalies (NEE) and LE greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A) and extremely low (B) temperatures in temperate wetland ecosystems.



*Рис. 3.* Процент дней с аномалиями потоков CO<sub>2</sub> (NEE) и LE, превышающими 1 стандартное отклонение (STD), возникающими одновременно с экстремально высокими (А) и экстремально низкими (Б) температурами в болотных экосистемах полярных широт.

*Fig. 3.* The percentage of days when  $CO_2$  flux anomalies (NEE) and LE greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A) and extremely low (B) temperatures in polar wetland ecosystems.

Экстремально высокие значения температуры также сопровождались положительными аномалиями потока LE на болотах из-за интенсификации процессов испарения с повышением температуры. Эта взаимосвязь наблюдается во всех рассмотренных болотных экосистемах: 18-68% дней с аномально высокими температурами, отмечались положительные аномалии потока LE (Рис. 2А и 3А, зеленые столбцы). Холодные периоды, приходящиеся на теплое время года, во всех исследуемых экосистемах в основном вызывают сильные отрицательные аномалии LE в 8-75% дней из-за подавления испарения при низких температурах (Рис. 2Б и 3Б, желтые столбцы).

Мгновенный отклик болотных экосистем на интенсивные осадки (превышающие 95% квантиль) практически на всех рассматриваемых станциях проявлялся в виде увеличения эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу: 33-57% дней в болотных экосистемах умеренных широт (Рис. 4А, красные столбцы) и 7-60% дней в экосистемах полярных широт (Рис. 4Б, красные столбцы) с экстремальными осадками связаны с положительными аномалиями NEE, превышающими стандартное отклонение. Наблюдаемый отклик может быть связан с «эффектом Бирча» [Birch, 1964], который проявляется в интенсификации почвенного дыхания в результате резкого повышения влажности почвы и, как следствие, увеличения скорости разложения и минерализации органического вещества при сильных осадках и повышении уровня грунтовых вод [Manzoni et al., 2020]. Поток LE при интенсивных осадках уменьшается и сопровождается отрицательной аномалией потока (Рис. 4А и 4Б, желтые столбцы), что указывает на уменьшение скорости испарения из-за высокой влажности воздуха и снижения приходящей солнечной радиации.





*Fig. 4.* The percentage of days when  $CO_2$  flux anomalies (NEE) and LE greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high precipitation in temperate (A) and polar (B) wetland ecosystems.

Анализ кумулятивного эффекта (индекс API) экстремально высоких осадков на NEE показывает преобладание положительных аномалий NEE над отрицательными в болотных экосистемах как в умеренных широтах (Рис. 5А), так и на некоторых станциях в полярных широтах (Рис. 6А). Следует также отметить, что процент дней с увеличением поглощения CO<sub>2</sub> при максимуме выпавших за предыдущие две недели осадков существенно выше, чем для мгновенного отклика NEE на кратковременные ливни: 10-25% дней в умеренных широтах (Рис. 5А, голубые столбцы) и 5-20% дней в полярных широтах (Рис. 5Б, голубые столбцы). Увеличение поглощения CO<sub>2</sub> в период времени после выпадения обильных осадков может быть связано с усилением скорости фотосинтеза

растительного покрова при солнечной погоде и оптимальных условиях почвенного увлажнения. Также после продолжительных осадков увеличивается поток LE во всех болотных экосистемах, что, в свою очередь, может быть связано с высокой обводненностью болот и высокими значениями приходящей солнечной радиации.



*Рис.* 5. Процент дней с аномалиями потоков CO<sub>2</sub> (NEE) и LE, превышающими 1 стандартное отклонение (STD), возникающими одновременно с экстремально высокими (А) и экстремально низкими (Б) значениями индекса API в болотных экосистемах умеренных широт.

*Fig. 5.* The percentage of days when  $CO_2$  flux anomalies (NEE) and LE greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A) and extremely low (B) API values in temperate wetland ecosystems.



*Рис. 6.* Процент дней с аномалиями потоков CO<sub>2</sub> (NEE) и LE, превышающими 1 стандартное отклонение (STD), возникающими одновременно с экстремально высокими (А) и экстремально низкими (Б) значениями индекса API в болотных экосистемах полярных широт.

*Fig.* 6. The percentage of days when  $CO_2$  flux anomalies (NEE) and LE greater than 1 STD occurred simultaneously with extremely high (A) and extremely low (B) API values in polar wetland ecosystems.

Продолжительное отсутствие осадков, которое представлено экстремально низкими значениями API, сопровождается в большинстве рассматриваемых болотных экосистем отрицательными аномалиями потока NEE (усиление поглощения CO<sub>2</sub>) (Рис. 5Б и 6Б). Это характеризует высокий адаптивный потенциал исследуемых болотных экосистем к кратковременным (менее 14 дней) периодам без осадков. С другой стороны, усилению поглощения CO<sub>2</sub> могла способствовать малооблачная погода, преобладающая в периоды без осадков, которая сопровождается увеличением притока суммарной солнечной радиации и интенсификации процессов фотосинтеза у растительных сообществ. Положительные аномалии NEE встречались чаще отрицательных в ов время продолжительного отсутствия осадков на некоторых станциях, расположенных в зоне многолетней мерзлоты (RU-Che, US-ICs, CA-WP1). В данных регионах на увеличение экосистемного дыхания может оказывать влияние усиление гетеротрофного дыхания за счет вклада оттаявших, богатых органическим веществом многолетнемерзлых почв.

Важно отметить, что аномалии потоков зачастую не совпадали с экстремумами температуры или осадков, что указывает на сильное влияние различных абиотических и биотических факторов на функционирование болотных экосистем, которые проявляются по-разному в отдельных растительных сообществах. Некоторые связи, выявленные на различных станциях умеренных и полярных широт, могли формироваться вследствие комбинированного влияния сразу нескольких внешних факторов. Во многих случаях такое комбинированное воздействие температуры и осадков может приводить к положительным аномалиям NEE и LE (красные и зеленые столбцы). Воздействие солнечной радиации также оказывало влияние, приводя к отрицательным аномалиям NEE и положительным аномалиям LE в периоды снеготаяния (включая периоды без осадков).

### выводы

Анализ откликов среднесуточных значений NEE и LE на экстремальные явления погоды, связанные с аномально высокими/низкими температурами и осадками, выявил их большое разнообразие, связанное в первую очередь с географическим положением, региональными климатическими условиями, ландшафтными особенностями, устойчивостью различных растительных сообществ к атмосферному воздействию, а также иными биотическими и абиотическими факторами.

В умеренных и полярных широтах аномальные температуры и осадки оказывают сопоставимое воздействие на NEE и LE. Также положительные аномалии NEE встречались чаще отрицательных. Экстремальные погодные условия в основном были связаны с эмиссией CO<sub>2</sub>, а не с поглощением изза подавленных процессов ассимиляции, связанных с аномально жаркими и сухими периодами, с сильным снижением GPP при более низких температурах, а также с высокими скоростями разложения органического вещества почвы и автотрофного и гетеротрофного дыхания во влажные периоды.

Разнообразие в отклике экосистем внутри одного биома на аномальные температуры и осадки указывает на сложную систему взаимодействия между погодными экстремумами и NEE и испарением. Очевидно, что изучение таких взаимодействий должно быть расширено за счёт включения большего количества станций мониторинга потоков за более длительные периоды времени.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 22-17-00073.

# ПРИЛОЖЕНИЕ APPENDIX

Таблица II1. Станции сети FLUXNET, выбранные для анализа отклика NEE и LE на аномалии температуры и осадков в болотных экосистемах.

Table A1. The FLUXNET wetland stations selected for analysis of flux response to extreme weather conditions.

Тип биома (классификация IGBP)	Станция (код FLUXNET)	Тип климата (по Кёппену)	Широта и долгота	Высота над уровнем моря, м	Период измерений
WET Водно-болотные угодья: земли с постоянно стоящей водой, травянистой или древесной растительностью, покрывающие значительные площади	RU-Che	Dfc	68.61 с. ш., 161.34 в. д.	6	2002-2005
	US-BZF	Dfd	64.70 с. ш., -148.31 з. д.	95	2011-2021
	US-ICs	ET	68.60 с. ш., -149.31 з. д.	920	2007-2021
	SE-St1	Dfc	68.35 с. ш., 19.05 в. д.	351	2012-2014
	SJ-Adv	ET	78.18 с. ш., 15.92 в. д.	17	2011-2014
	GL-NuF	ET	64.13 с. ш., -51.38 з. д.	50	2008-2014
	CA-SCB	Dfc	61.30 с. ш., -121.29 з. д.	280	2014-2019
	CZ-wet	Dfb	49.02 с. ш., 14.77 в. д.	426	2006-2014
	DE-Akm	Cfb	53.86 с. ш., 13.68 в. д.	-1	2009-2014
	DE-Spw	Cfb	51.89 с. ш., 14.03 в. д.	61	2010-2014
	CA-DBB	Csb	49.12 с. ш., -122.98 з. д.	4	2014-2020
	CA-ARB	Dfb	52.69 с. ш., -83.94 з. д.	90	2011-2015
	CA-ARF	Dfb	52.70 с. ш., -83.95 з. д.	88	2011-2015
	CA-WP1	Dfc	54.95 с. ш., -112.46 з. д.	540	2003-2009
	US-ALQ	Dfb	46.03 с. ш., -89.60 з. д.	12	2015-2022

#### ЛИТЕРАТУРА

Anjileli H., Huning L.S., Moftakhari H., Ashraf S., Asanjan A.A., Norouzi H., AghaKouchak A. 2021. Extreme heat events heighten soil respiration. *Scientific Reports.*, 11(1): 6632. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85764-8.

Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012; p. 438. ISBN 9789400723504.

Belward A.S., Estes J., Kline K. et al. 1999. The IGBP-DIS global 1-km land-cover data set DIS-Cover: A project overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(9): 1013-1020.

Birch H.F. 1964. Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions. Plant Soil, 20, 43-49.

Charrier G. Martin-StPaul N., Damesin C., Delpierre N., Hänninen H., Torres-Ruiz J.M., Davi H. 2021. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks. *Annals of Forest Science*. 78(2): 1-15. https://doi.org/10.1007/s13595-021-01052-5.

Ciais P., Reichstein M., Viovy N. et al. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*. 437(7058): 529-533. DOI: 10.1038/nature03972.

Dinsmore K.J., Billett M.F., Dyson K.E. 2013. Temperature and precipitation drive temporal variability in aquatic carbon and GHG concentrations and fluxes in a peatland catchment. *Global change biology*, 19(7): 2133-2148. DOI: 10.1111/gcb.12209.

FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report; FAO: Rome, Italy, 2020; P. 11-23. DOI: 10.4060/ca9825en. Frank D., Reichstein M., Bahn M., Thonicke K., Frank D., Mahecha M.D., Smith P., van der Velde M., Vicca S., Babst F. et

al. 2015. Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: Concepts, processes and potential future impacts. *Glob. Chang. Biol.*, 21: 2861-2880. DOI: 10.1111/gcb.12916.

Fratini G., Mauder M. 2014. Towards a consistent eddy-covariance processing: an intercomparison of EddyPro and TK3. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7): 2273-2281. DOI: 10.5194/amt-7-2273-2014.

Gill A.L., Giasson M.A., Yu, R., & Finzi A.C. 2017. Deep peat warming increases surface methane and carbon dioxide emissions in a black spruce-dominated ombrotrophic bog. *Global change biology*, 23(12): 5398-5411. DOI: 10.1111/gcb.13806. Gushchina D., Tarasova M., Satosina E. et al. 2023. The Response of Daily Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes to

Gushchina D., Tarasova M., Satosina E. et al. 2023. The Response of Daily Carbon Dioxide and Water Vapor Fluxes to Temperature and Precipitation Extremes in Temperate and Boreal Forests, *Climate*, 11(10): 206. DOI: 10.3390/cli11100206.

Kramer R.D., Ishii H.R., Carter K.R., Miyazaki Y., Cavaleri M.A., Araki M.G., Azuma W.A., Inoue Y., Hara C. 2020. Predicting effects of climate change on productivity and persistence of forest trees. *Ecol. Res.*, 35: 562-574. DOI: 10.1111/1440-1703.12127.

Li X., Wei Y., Li F. 2021. Optimality of antecedent precipitation index and its application. *Journal of Hydrology*, 595: 126027. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126027.

Mamkin V., Avilov V., Ivanov D., Varlagin A., & Kurbatova J. 2023. Interannual variability in the ecosystem CO2 fluxes at a paludified spruce forest and ombrotrophic bog in the southern taiga. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(3), 2273-2291. DOI: 10.5194/acp-23-2273-2023.

Manzoni S., Chakrawal A., Fischer T., Schimel J.P., Porporato A., Vico G. 2020. Rainfall intensification increases the contribution of rewetting pulses to soil heterotrophic respiration. *Biogeosciences*. 17(15): 4007-4023. DOI: 10.5194/bg-17-4007-2020.

Oechel W., Hastings S., Vourlrtis G. et al. 1993. Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source. *Nature* 361: 520-523. DOI: 10.1038/361520a0.

Park S.B., Knohl A., Migliavacca M., Thum T., Vesala T., Peltola O., Mammarella I., Prokushkin A., Kolle O., Lavrič J., Park S.S. and Heimann M. 2021. Temperature Control of Spring CO2 Fluxes at a Coniferous Forest and a Peat Bog in Central Siberia, *Atmosphere*, 12: 984, DOI: 10.3390/atmos12080984.

Post E., Forchhammer M.C., Bret-Harte M.S. et al. 2009. Ecological dynamics across the Arctic associated with recent climate change. *Science*, 325(5946): 1355-1358. DOI: 10.1126/science.1173113.

Reichstein M., Falge E., Baldocchi D., Papale D., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Gilmanov T., Granier A. et al. 2005 On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Glob. Chang. Biol.*, 11: 1424-1439. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x.

Ritter F., Berkelhammer M., Garcia-Eidell C. 2020. Distinct response of gross primary productivity in five terrestrial biomes to precipitation variability. *Commun. Earth Environ.* 1(1): 34 DOI: 10.1038/s43247-020-00034-1.

Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1): 81-91. DOI: 10.4155/cmt.13.77.

Sirin A., Laine J. 2008. *Peatlands and greenhouse gases, in: Assessment on peatlands, biodiversity and climate change, main report* / Parish F., Sirin A., Charman D. et al. (eds.). Wageningen, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, pp. 118-138.

Smith M.D. 2011. An ecological perspective on extreme climatic events: A synthetic definition and framework to guide future research. J. Ecol. 99: 656-663. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01798.x

The Changing State of the Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Masson-Delmotte V., Zhai P. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2021; pp. 287-422; ISBN 9781009157896.

The Data Portal serving the FLUXNET community. [Электронный pecypc]: https://fluxnet.org/data/, свободный. – Загл. с экрана.

Ummenhofer C.C., Meeh I.G.A. 2017. Extreme weather and climate events with ecological relevance: A review. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 372: 20160135. DOI: 10.1098/rstb.2016.0135.

Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J., Sickel K., Šigut L., Menzer O., Reichstein M. 2018. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15: 5015-5030. DOI: 10.5194/bg-15-5015-2018.

Xu J., Morris P.J., Liu J., & Holden J. 2018. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a metaanalysis. *Catena*, 160: 134-140. DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010.

Zhang Z. Ju, W., Zhou Y., & Li X. 2022 Revisiting the cumulative effects of drought on global gross primary productivity based on new long-term series data (1982-2018). *Global Change Biology*, 28(11): 3620-3635. DOI: 10.1111/gcb.16178.

Zheleznova I.V., Gushchina D.Y. 2023. Variability of extreme air temperatures and precipitation in different natural zones in late XX and early XXI centuries according to ERA5 reanalysis data. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2023, 59: 479-488. DOI: 10.31857/S0002351523050139 (in Russian) [Железнова И.В., Гущина Д.Ю. Изменчивость экстремальных температур воздуха и осадков в конце XX и начале XXI века в различных природных зонах по данным реанализа ERA5 // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана. 2023. Т. 59. С. 479-488. DOI: 10.31857/S0002351523050139].

Поступила в редакцию: 14.08.2024 Переработанный вариант: 01.11.2024