

**ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА И ВЛАЖНОСТИ  
НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ ТОРФЯНЫХ БОЛОТ  
(НА ПРИМЕРЕ ГРЯДОВО-МОЧАЖИННОГО КОМПЛЕКСА БОЛОТА МУХРИНО)**

*Дюкарев Е.А.<sup>1,2\*</sup>, Преис Ю.И.<sup>1</sup>, Заров Е.А.<sup>2</sup>*

<sup>1)</sup> *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*

<sup>2)</sup> *Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

\*e\_dyukarev@ugrasu.ru

**EFFECTS OF MICROTOPOGRAPHY AND MOISTURE  
ON PEATLAND SOIL TEMPERATURE REGIME  
(A CASE STUDY OF THE RIDGE-HOLLOW COMPLEX MUKHRINO BOG)**

*Dyukarev E.A.<sup>1,2\*</sup>, Preis Yu.I.<sup>1</sup>, Zarov E.A.<sup>2</sup>*

<sup>1)</sup> *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*

<sup>2)</sup> *Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia*

\*e\_dyukarev@ugrasu.ru

**Citation:** Dyukarev E.A., Preis Yu.I., Zarov E.A. 2026. Effects of Microtopography and Moisture on Peatland Soil Temperature Regime (A Case Study of the Ridge-Hollow Complex Mukhrino Bog). *Environmental dynamics and global climate change*, 17(1): 45-64.

**DOI:** 10.18822/edgcc701187

**АННОТАЦИЯ**

Исследование температурного режима торфяных болот, являющихся крупнейшим наземным резервуаром углерода, имеет критическое значение для прогнозирования их реакции на изменение климата. Устойчивость углеродного пула торфа напрямую зависит от термических условий, которые, в свою очередь, крайне неоднородны в пределах сложных болотных ландшафтов. Несмотря на признанную важность микроландшафтной дифференциации, для континентальных условий Западной Сибири сохраняется дефицит детальных многолетних данных о температурном режиме торфяной залежи, синхронно охватывающих все ключевые элементы болотных микроландшафтов.

Цель: выявить закономерности пространственно-временной изменчивости температуры торфяной залежи в грядово-мочажинном комплексе болота Мухрино и определить ключевые факторы, которые воздействуют на формирование температурного режима болот.

Методы: натурные автоматические измерения температуры почвы на глубинах от 0 до 50 см вдоль трансекты длиной около 30 м, охватывающей шейхцериево-сфагновую мочажину и кустарничково-сфагновую гряду на олиготрофном болоте Мухрино, с июля 2020 г. по октябрь 2022 г.

Результаты: выявлены устойчивые пространственно-временные закономерности термического режима грядово-мочажинного комплекса на локальном масштабе (5-25 м). Установлено, что переувлажнённые мочажины в среднем теплее повышенный микрорельефа (гряд) как летом, так и зимой. В тёплый сезон это обусловлено более высокой теплоёмкостью и теплопроводностью водонасыщенного торфа, который эффективно аккумулирует и передаёт тепло. На грядах сухой, аэрированный торф выступает как теплоизолятор, приводя к резким суточным колебаниям температуры на поверхности и быстрому затуханию тепла с глубиной. Зимой ключевым фактором становится снежный покров: его большая мощность в мочажинах обеспечивает эффективную теплоизоляцию, тогда как на грядах тонкий снежный слой приводит к сильному выхолаживанию и большей глубине промерзания (до 60 см против 20 см в мочажинах). Также обнаружено, что южная мочажина стабильно теплее северной на 1-2°C, а в отдельные летние дни на глубине 5-10 см гряда может быть теплее мочажины из-за особенностей теплообмена.

Выводы: температурный режим торфяной залежи формируется в результате сложного взаимодействия микрорельефа, режима увлажнения торфа и снежного покрова, причём физические механизмы этого взаимодействия имеют сезонную специфику. Полученные количественные данные о контрастных температурных режимах сопряженных микроландшафтов и их связи с физическими свойствами торфа имеют важное значение для понимания и моделирования биогеохимических процессов, в частности для оценки

потоков парниковых газов и прогнозирования реакции торфяников на изменение климата в условиях Западной Сибири.

**Ключевые слова:** торфяники, торфяные болота, температурный режим почв, микрорельеф, грядово-мочажинный комплекс, Западная Сибирь, снежный покров, влажность торфа, сезонное промерзание, пространственно-временная изменчивость, автоматический мониторинг, теплофизические свойства торфа.

#### ABSTRACT

Northern peatlands represent one of the largest terrestrial carbon reservoirs, playing a crucial yet potentially vulnerable role in the global carbon cycle under ongoing climate change. The stability of this vast carbon stock is intrinsically linked to the thermal regime of the peat soil, which controls key biogeochemical processes such as microbial decomposition, methane production, and plant productivity. However, peatlands are not thermally uniform; they are characterized by a pronounced microtopography, typically featuring a mosaic of elevated, drier features (ridges, hummocks) and water-saturated hollows. Understanding the spatiotemporal dynamics of temperature within this micro-landscape is therefore fundamental for accurate prediction of peatland response to warming. While the general influence of microrelief on temperature is recognized, there is a significant lack of detailed, high-frequency, and multi-year datasets that simultaneously capture the thermal behavior of all key microform elements in continental boreal peatlands, particularly in the vast and critically important region of Western Siberia. This study aims to fill this gap by providing a comprehensive, quantitative analysis of the soil and surface temperature regime in a typical ridge-hollow complex.

The research was conducted at the Mukhrino Bog, a large oligotrophic mire in the Middle Taiga zone of Western Siberia. The study site features a classic ridge-hollow complex (RHC) with well-defined shrub-*Sphagnum*-dominated ridges (1-3 m wide, up to 60 cm high) and water-saturated sedge-*Sphagnum* hollows. To investigate the temperature regime, a dedicated monitoring system was deployed in July 2020. The setup included an array of automatic temperature sensors (DS18B20) installed along a 27-meter transect crossing a sequence of a northern hollow, a ridge, and a southern hollow. A total of 11 soil temperature profilers were placed on characteristic microfeatures (hummocks, depressions, slopes), each measuring temperature at depths of 0, 2, 5, 10, 15, 20, 40, and 60 cm. One additional deep probe monitored temperatures down to 320 cm at a ridge location. Air temperature was measured at 2 m and 15 cm above the surface. Data were logged hourly from July 2020 to November 2022. Complementary field measurements included precise leveling of the microrelief and, in April 2023, sampling of frozen peat monoliths from both a ridge and a hollow for subsequent laboratory determination of natural moisture content and absolute dry peat density.

The three-year monitoring period captured a significant range of meteorological conditions, including an extremely cold and low snow accumulation winter in 2020/2021 and a milder with high snow accumulation winter in 2021/2022, as well as contrasting summer conditions. The results reveal a persistent and clear spatial pattern: the saturated hollows were consistently warmer than the elevated ridges throughout the annual cycle. However, the underlying physical drivers of this thermal contrast were seasonally distinct.

During the warm season (April-October), the primary mechanism is the difference in the thermophysical properties of the peat. Water-saturated hollow peat has high volumetric heat capacity and thermal conductivity. This leads to efficient absorption, deeper penetration, and slower release of heat. Consequently, diurnal temperature amplitudes are strongly dampened with depth in the hollows. In contrast, the aerated, drier peat of the ridges has a high pore air content, which acts as an effective insulator. This results in extreme surface heating (up to +34.4°C) and cooling, but a very sharp attenuation of these fluctuations with depth. The ridge peat essentially functions as a "reverse thermos," inhibiting heat transfer into the deeper layers. Data from July 2020, the warmest month, quantitatively illustrate this: the mean monthly surface temperature was +21.2°C in the northern hollow versus +19.6°C on the ridge. More importantly, the temperature difference increased with depth, reaching +2.2°C at 60 cm. The southern hollow was consistently 1-2°C warmer than the northern hollow, likely due to higher water saturation.

In winter (November-March), the dominant factor shifts to the snow cover distribution. The microtopography dictates snow accumulation: deeper snowpacks form in the hollows, while wind exposure keeps the ridges relatively snow-free. Snow is an excellent insulator. Therefore, the thick snow layer over the hollows effectively decouples the soil from the extreme cold air temperatures, maintaining surface temperatures close to 0°C. Over the ridges, the thin snow cover provides minimal insulation, leading to intense soil cooling. In December 2020, the mean surface temperature on the ridge was -9.8°C, while in the hollow it was only -0.9°C—a difference of 9°C. This snow-mediated effect directly controls the depth of seasonal frost. During the harsh winter of 2020/2021, the frost depth reached >60 cm on the ridge but only about 30 cm in the hollow. In the following, milder winter, maximum frost depths were ~55 cm and ~12 cm, respectively. The latent heat released during freezing of the water-saturated hollow peat further moderates cooling.

High-resolution data from a 13-day period in June 2022 further elucidated the diurnal dynamics. Under cloudy, rainy periods, temperatures were uniform across the microrelief. With the onset of clear, anticyclonic conditions, strong diurnal contrasts emerged. During the day, the northern hollow heated most strongly (up to +33.5°C), while shaded areas on the ridge remained cooler. At night, the hollows (especially the southern one) cooled more slowly than the ridge, maintaining a higher temperature. These near-surface patterns persisted to a depth 10 cm. At 20 cm depth, diurnal

cycles were almost absent in the hollow but remained pronounced (5-7°C amplitude) on the ridge. Below 40 cm, diurnal variations vanished everywhere, revealing the persistent background spatial pattern: warmer hollows and cooler ridges.

Analysis of peat properties confirmed the foundational differences: the hollow peat maintained a very high natural moisture content (94-98%), while the ridge peat showed lower and more variable moisture (85-95%) and slightly higher dry density in the surface layer.

In conclusion, this study demonstrates that the thermal regime of a boreal peatland is governed by a dynamic interplay between microtopography, moisture content, and snow cover, with seasonally switching dominant mechanisms. The water-saturated hollows act as thermally buffered, energy-accumulating elements, while the aerated ridges experience thermal extremes and function as insulators. The spatial pattern of temperature—warmer hollows, cooler ridges—is a robust feature sustained year-round. The quantified relationships and the extensive dataset presented here are essential for improving process-based models of heat and water transfer in peatlands. This, in turn, enhances our ability to forecast the fate of the massive carbon stored in these ecosystems under changing climatic conditions, particularly for the extensive and vulnerable peatlands of Western Siberia. The observed thermal heterogeneity underscores the necessity of representing microtopographic diversity in landscape-scale models to prevent significant biases in forecasting carbon cycle feedbacks.

**Keywords:** peatlands, peat bogs, soil temperature regime, microtopography, ridge-hollow complex, Western Siberia, snow cover, peat moisture, seasonal freezing, spatio-temporal variability, automated monitoring, thermal properties of peat.

## ВВЕДЕНИЕ

Торфяные болота бореального пояса являются одним из крупнейших резервуаров углерода среди наземных экосистем [Yu., 2012]. Они обладают невысокой чистой первичной продукцией по сравнению с другими экосистемами, но благодаря низкой скорости разложения они аккумулировали значительные количества углерода на протяжении тысячелетий [Clymo et al., 1998; Lapshina, Zarov, 2023; Amon et al., 2025]. Современные запасы углерода оцениваются приблизительно в 200-550 ПгС на площади около 3,5 млн км<sup>2</sup> (Gorham, 1991; Yu, 2012). В Западной Сибири болотные комплексы занимают площадь, оцениваемую в 42% от общероссийской площади болот [Vomperskiy et al., 1994; Sheng et al., 2004]. Территория Западной Сибири характеризуется высокой долей болотных экосистем в нативном состоянии, что делает ее идеальным объектом для изучения влияния глобальных изменений на биогеохимические процессы болотных экосистем во всем мире [Zemtsov et al., 1998].

Наблюдаемое потепление климата [IPCC, 2023; Katsov, 2022] может нарушить равновесие в северных болотах, в результате чего скорость потерь углерода превысит скорость его накопления [Natali et al., 2019; López-Blanco et al., 2025]. В результате болота могут превратиться в его чистый источник, усиливая парниковый эффект. Стабильность углеродного пула болот напрямую зависит от термических условий [Baird et al., 2010].

Неоднородность микрорельефа и структуры растительного покрова является ключевым фактором, регулирующим температурную дифференциацию приземного слоя воздуха и почвы [Shulgin, 1967; Khoroshev, Dyakonov, 2020]. Эта дифференциация возникает из-за пространственного перераспределения потоков лучистой энергии, а также из-за различий в альбедо, влагообороте и турбулентном теплообмене. Мезо- и микроландшафтные паттерны создают мозаику термических условий, которая определяет интенсивность и направленность процессов энерго- и массообмена [Bridgham et al., 1999; Chechin et al., 2024], гидрохимических параметров [Litvinov et al., 2025] и микробиологических процессов [Keiser et al., 2025].

Неоднородность температуры почвы создает мозаику условий, определяющих «горячие точки» биогеохимической активности [Leonard, 2018, 2021; Briones et al., 2022]. Например, в бореальных лесах и тундре микроклиматические вариации на небольших расстояниях могут быть сопоставимы с широтными градиентами [Aalto et al., 2022; Raudina et al., 2025; Voropaу, Ponomarev, 2025]. В горных болотах растительный покров выступает ключевым буфером, формирующим летние термические рефугиумы [Horsák et al., 2021; Moore, Evans, 2022]. Локальные абиотические факторы (температура, влажность) зачастую являются более значимыми управляющими параметрами для микробных сообществ и процессов разложения, чем тип растительности [Chaudhary et al., 2018; Briones et al., 2022].

Применительно к торфяникам многочисленные исследования выявили сложную взаимосвязь между микрорельефом (гряды/кочки и мочажины), гидрологией, тепловым режимом и углеродным циклом. Показано, что повышенные элементы рельефа (гряды, кочки) из-за лучшего дренажа и более

тонкого снежного покрова зимой сильнее промерзают и летом имеют более амплитудный суточный ход температуры, в то время как обводненные мочажины характеризуются сглаженным и более теплым режимом благодаря высокой теплоемкости воды и изолирующей роли снега [Raudina et al., 2025]. Эта термическая дифференциация напрямую влияет на потоки парниковых газов: мочажины обычно являются более активными поглотителями CO<sub>2</sub> [Kulik, Zarov, 2024] и основными источниками CH<sub>4</sub> [Dyukarev et al., 2024]. Важным физическим механизмом, усугубляющим различия, может быть конвективный перенос тепла воздухом в пористом торфе кочек [Dimitrov et al., 2010]. Пространственная организация этих микроландшафтов, контролируемая гидротопографическими градиентами и авторегуляторными процессами в растительных сообществах, формирует четкую мозаику условий [Graham et al., 2016; Ratcliffe et al., 2017].

Несмотря на значительный прогресс в натуральных исследованиях неоднородности температурного режима почв, существует дефицит детальных, многолетних и высокочастотных измерений температуры поверхности и почвы, синхронно охватывающих все ключевые элементы комплексных болотных ландшафтов в континентальных условиях Западной Сибири, что ограничивает точность моделей теплопереноса. Слабо изучена количественная связь термического режима с физическими свойствами торфа (естественной влажностью, плотностью) в пределах одного комплекса на разных элементах микрорельефа. Также требуется более глубокий анализ того, как сезонные переходы (снеготаяние, установление снежного покрова) модулируют пространственные температурные контрасты и глубину сезонного промерзания.

Целью работы является выявление закономерностей пространственно-временной изменчивости температуры торфяной толщи в грядово-мочажинном комплексе болота Мухрино и определение ключевых факторов (микрорельеф, режим увлажнения, снежный покров), влияющих на формирование температурного режима. Данное исследование предоставляет уникальный детальный набор данных, необходимых для валидации и совершенствования моделей теплопереноса и углеродного цикла в гетерогенных ландшафтах.

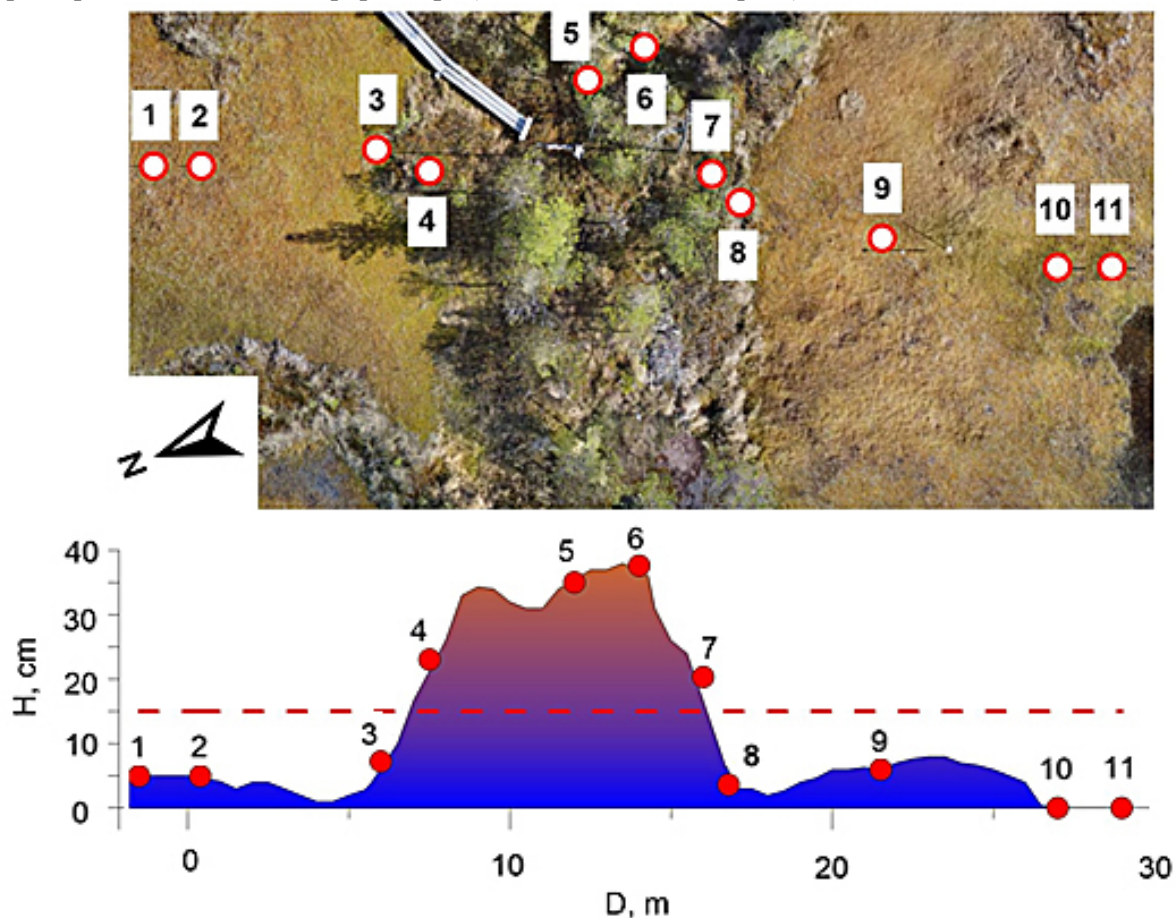
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Температурный режим комплексного болотного ландшафта изучен на примере грядово-мочажинного комплекса (ГМК) болота Мухрино [Kurgianova et al., 2022; Piyasov et al., 2023; Dyukarev et al., 2025], где проводятся комплексные исследования функционирования болотных экосистем.

ГМК является типичным ландшафтом бореальной зоны Западной Сибири, занимая около 43% площади всех болот в зоне средней тайги [Terentieva et al., 2020]. В структуре ГМК болота Мухрино выделяются крупные осоково-сфагновые мочажины, занимающие 49,3% площади, узкие сосново-кустарничковые гряды (30,5%) и водные объекты (7,3%) [Zarov et al., 2022]. Растительность мочажин представлена редкими и невысокими побегами осоки и трав. Моховой покров мочажин представлен топяными мхами рыхлого сложения. Сосново-кустарничково-сфагновые гряды шириной 1-3 м и высотой до 60 см (относительно мочажин) покрыты плотным ковром сфагнума бурого, над которым возвышаются кустарнички (багульник, андромеда), травы (пушица, морошка и пр.) и отдельные сосны высотой 1-5 м. Структура гряд неоднородна, здесь присутствуют кочки, микропонижения, ямки. Уровень воды на мочажинах в течение года меняется слабо в диапазоне 2-10 см. Средний уровень болотных вод составляет 2 см для мочажин и 35 см для гряд [Dyukarev et al., 2021; Zarov et al., 2025]. Кочки гряды возвышаются над уровнем водной поверхности на 30-60 см.

Для изучения температурного режима неоднородного болотного ландшафта на участке ГМК болота Мухрино в июле 2020 г. был размещен измерительный комплекс АПИК (атмосферно-почвенный измерительный комплекс, серийный номер 5000056). В состав комплекса [Kiselev et al., 2017] входят автономный логгер-регистратор, система передачи данных по сети GSM, всепогодный ящик для размещения оборудования, аккумулятор, солнечная панель и набор внешних датчиков температуры: три датчика температуры воздуха в радиационной защите, зонд температуры почвы с 14 цифровыми датчиками температуры DS18B20 на глубинах 0-320 см, десять зондов температуры почвы с 8 датчиками на глубинах 0, 2, 5, 10, 15, 20, 40 и 60 см. Один датчик температуры воздуха установлен на стандартной высоте (2 м) на мочажине. Два других датчика измеряют температуру приповерхностного слоя воздуха на гряде и мочажине на высоте 15 см над поверхностью мха. В зимнее время датчики приповерхностного слоя воздуха покрываются снегом. Одиннадцать зондов температуры размещены вдоль трансекты мочажина-гряда-мочажина (М-Г-М), начинающейся в

окраинной части (60x40 м) мочажины к северо-востоку от гряды, пересекающей в поперечном направлении небольшую грядку шириной около 10 м и продолжающейся на юго-западной обширной мочажине (100x70 м) с мелким озерком (50x10 м) в центре. Общая длина трансекты М-Г-М составляет 27 м (Рис. 1). Зонды температуры почвы (2-10) размещены не вдоль прямой линии, а на характерных элементах микрорельефа (кочки/межкочья на гряде).



**Рис. 1.** Схема размещения датчиков температуры (зондов) на грядово-мочажинном комплексе (сверху) и высота поверхности вдоль трансекты М-Г-М (снизу). Красная линия – условное разделение на грядку и мочажину.

**Fig. 1.** Layout of temperature sensors (probes) on the ridge-hollow complex (top) and surface height along the H-R-H transect (bottom). The red line is the conditional boundary between the ridge and the hollow.

Проведена нивелировка микрорельефа ГМК вдоль трансекты (Рис. 1) с шагом 50 см. Высота «северной» мочажины составляет 1-5 см, а «южной» мочажины – 0-8 см над уровнем стояния воды на момент нивелировки (20 июля 2020 г.). Высота гряды достигает 38 см при среднем значении 31 см. Предположим, что участки, расположенные выше 15 см над уровнем воды, отнесены к гряде (красная линия на Рис. 1). Пункты измерений № 2, 9 и 10 находятся на мочажинах, пункты № 3 и 4, № 7 и 8 – на северном и южном склоне гряды, а пункты № 5 и 6 – в центральной части гряды. Для улучшения визуализации результатов измерений значения с датчиков № 2 и 10 были экстраполированы на пункты № 1 и 11, расположенные за пределами измеряемого профиля. На «южной» мочажине и гряде были отобраны образцы (9 апреля 2023 г.), для которых определены плотность и естественная влажность торфа. В полевых условиях монолиты мёрзлого торфа в форме прямоугольного бруска от поверхности до глубины промерзания были выпилены бензопилой. Таким образом, удалось извлечь монолиты глубиной 22 см на мочажине и 30 см на гряде. В лаборатории мёрзлые монолиты были разрезаны на образцы размером 4x4x2 см. Для каждого исследуемого горизонта все измерения выполнялись в трехкратной аналитической повторности для обеспечения достоверности. Для каждого образца определялись его объём и масса в сыром состоянии. После этого образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 105°C до постоянной массы. На основе полученных данных рассчитывалась естественная влажность торфа как процентное отношение массы

потерянной воды к массе абсолютно сухого образца, а также плотность абсолютно сухого торфа как отношение массы сухого материала к первоначальному объёму.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Влажность и плотность образцов торфа.** Определение естественной влажности ( $W_{\text{ест}}$ ) торфа показало, что насыщенность водой (в мерзлом состоянии в зимний период) максимальна под мочажинной (Рис. 1, точка 9) и варьирует незначительно с глубиной: от 94.3 до 98.1%. Под грядой (Рис. 1, точка 5) влажность ниже. В приповерхностном слое  $W_{\text{ест}}$  составляет 90%, а уже на глубине 4 см снижается до 84.8%, далее  $W_{\text{ест}}$  возрастает, достигая 94.2% на глубине 14 см, а затем слабо снижается до 92.8% на уровне 22 см.

Плотность абсолютно сухого торфа ( $P_{\text{аст}}$ ) под мочажинной и грядой низкая и варьирует незначительно – от 9.6 до 25.0 г/дм<sup>3</sup>, лишь под мочажинной в слое 22-24 см  $P_{\text{аст}}$  достигает 53.3 г/дм<sup>3</sup>.

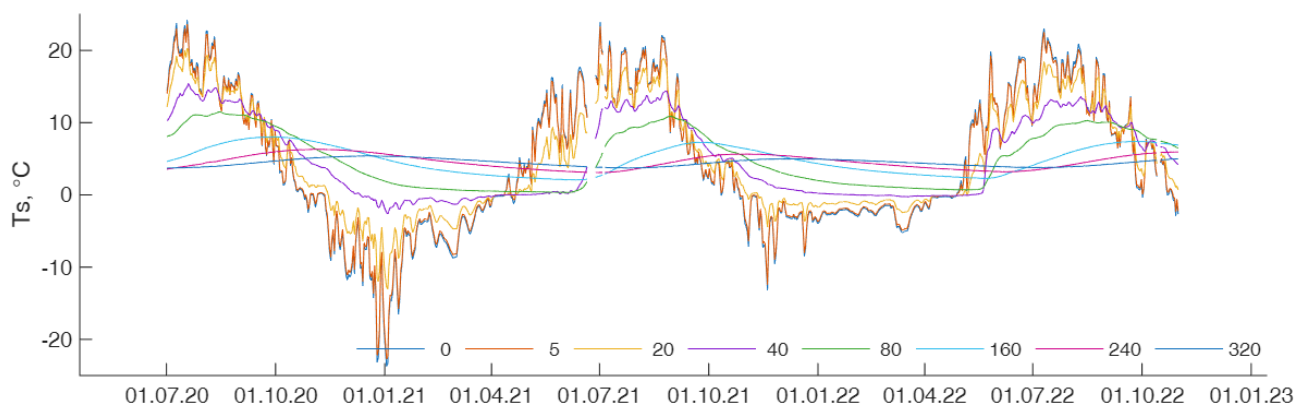
**Климатические условия.** На основе данных многолетних измерений автоматической метеостанции [Dyukarev et al., 2021] климатические условия в районе проведения исследований можно охарактеризовать как резко континентальные с продолжительной холодной зимой и коротким тёплым летом. В течение трёх лет исследований самым тёплым месяцем был июль. Наиболее высокая средняя температура отмечалась в июле 2020 года (+19.2°C). В 2022 году июль был немного прохладнее (+18.4°C), а в 2021 году – самым прохладным за период (+16.6°C). Самым холодным месяцем за весь период наблюдений стал январь 2021 года со средней температурой -26.7°C. В остальные годы зимы были умеренно холодными: -13.8 и -15.9°C в январе 2020 и 2022 гг. соответственно. По данным наблюдений за три года ближайшей метеорологической станции (г. Ханты-Мансийск) январские температуры составили  $-18.8 \pm 3.1^\circ\text{C}$ , а температура июля  $+18.1 \pm 2.4^\circ\text{C}$ .

Анализ данных сумм осадков по метеостанции Ханты-Мансийск [Bulygina et al., 2025] показывает, что режим увлажнения характеризуется выраженной неравномерностью и значительной межгодовой изменчивостью. Наиболее влажным периодом в целом является тёплый сезон с мая по август, однако пики максимумов осадков в разные годы приходятся на разные месяцы. В 2020 г. максимальное количество осадков пришлось на август (95.1 мм), а относительно сухими были март, июль, сентябрь и ноябрь (менее 30 мм). В 2021 г. зафиксирован рекордный максимум осадков в мае (140.0 мм), что более чем вдвое превышает показатели этого месяца в другие годы. При этом летние месяцы того же года были не столь влажными, а в сентябре наблюдался второй пик осадков (91.3 мм). В 2022 г. отмечен крайне засушливый июль (6.9 мм) – абсолютный минимум за три года, тогда как июнь был очень влажным (114.9 мм). Сравнение летних сезонов показывает, что самым влажным было лето 2020 года (сумма 211.3 мм), самым сухим – лето 2021 года (139.8 мм), а лето 2022 года (176.2 мм) было наиболее контрастным. Наиболее снежной была зима 2021/2022 гг. (149 мм), а зима 2020/2021 гг. характеризовалась наименьшим количеством осадков (89.2 мм) и экстремально низкими температурами воздуха, что свидетельствует о преобладании антициклонального режима погоды.

**Суточная динамика температуры.** Регистрация температуры воздуха, поверхности и почвы проводилась с 1 июля 2020 г. по 1 ноября 2022 г. с интервалом 1 час. На рисунке 2 приведен временной ход температуры почвы по самому длинному зонду, установленному в пункте № 6 верхней части гряды. Данные, полученные с часовым интервалом и осреднённые до суточных значений, охватывают диапазон глубин от 0 до 320 см и наглядно демонстрируют сезонную динамику и затухание термических колебаний с глубиной. Летом температура поверхности мохового покрова достигала экстремальных значений до +34.4°C при средних суточных показателях около +26.1°C. Сравнение летних сезонов показывает, что наиболее тёплым был 2020 г., тогда как последующие летние сезоны были несколько прохладнее, что отразилось на максимальных температурах поверхности и глубинных слоёв. Зимой режим промерзания значительно варьировал между годами. Особенно выделяется экстремально холодная зима 2020/2021 гг., когда из-за сильных морозов и небольшой мощности снежного покрова, выполняющего роль теплоизолятора, температура поверхности почвы опускалась до -26.5°C. В более тёплую зиму 2021/2022 гг. минимальная температура поверхности составила лишь -11.6°C.

С глубиной амплитуда как суточных, так и годовых колебаний температуры резко уменьшается. Например, на глубине 60 см минимальные температуры в конце зимы (февраль – март) составляют от -0.1 до +0.2°C, а летние максимумы (июль – сентябрь) находятся в диапазоне +11.5-+12.9°C. На глубине 320 см наблюдается значительное запаздывание распространения тепловой

волны: годовому минимуму около  $+3.7^{\circ}\text{C}$  соответствует июль, а максимум  $+5.0$ - $+5.4^{\circ}\text{C}$  наблюдается в декабре. Сезонное промерзание почвы на грядово-мочажинном комплексе отмечается с ноября по май. При этом глубина промерзания существенно различается в зависимости от микрорельефа: в обводнённой мочажине она не превышает 20 см, в то время как на лучше дренированной и сильнее промерзающей гряде может достигать 60 см.



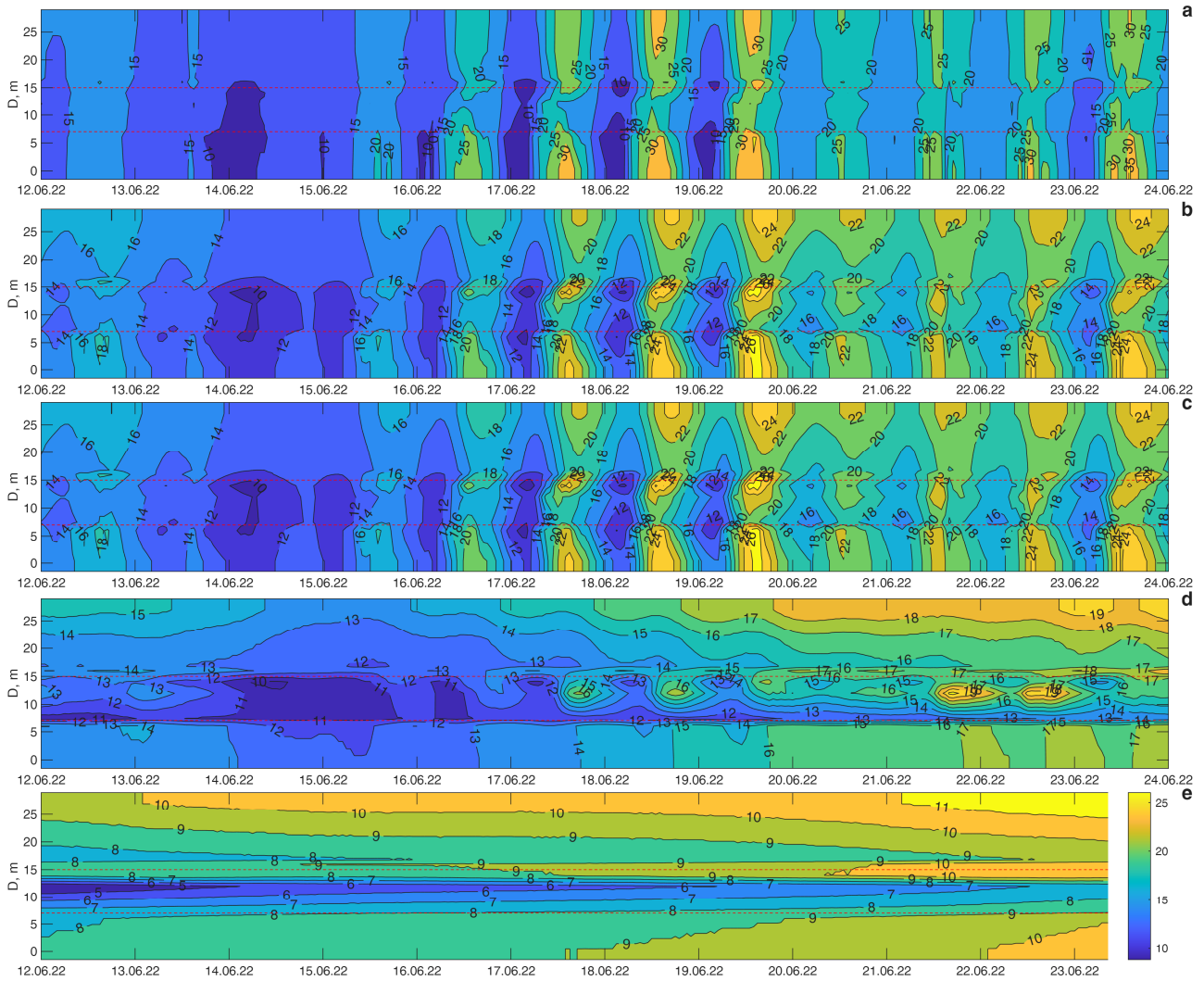
**Рис. 2.** Температура почвы (средние суточные значения) на глубинах 0-320 см. Зонд № 6 – гряда, 0-320 – глубина измерения температуры почвы.

**Fig. 2.** Soil temperature (mean daily values) at depths of 0-320 cm. Probe No. 6 – ridge. 0-320 – depth of soil temperature measurement.

Для иллюстрации пространственно-временной variability температуры на рисунке 3 показана температура поверхности почвы и температура на глубинах в период с 12 по 24 июня 2022 г. В этот период температура воздуха варьировала от  $+7.4$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ . С 12 по 15 июня в условиях прохладной дождливой погоды суточный ход температуры выражен слабо, а средняя суточная температура составляла  $+10.4 \div +14.5^{\circ}\text{C}$ . С 15 по 20 июня наблюдались значительные суточные перепады температуры воздуха амплитудой от 9 до  $20.4^{\circ}\text{C}$ , а средняя суточная температура воздуха увеличилась до  $+18.7 \div +21.5^{\circ}\text{C}$ . В последующие дни амплитуда суточных колебаний немного снизилась, а температура воздуха осталась высокой.

На рисунке 3а показана пространственно-временная изменчивость температуры поверхности. В прохладные дни (12-15 июня) температура поверхности на гряде и мочажине практически одинакова ( $+10 \div +18^{\circ}\text{C}$ ), за исключением ночи 14 июня, когда температура на гряде и северной мочажине опустилась до  $+8^{\circ}\text{C}$ . С наступлением ясных дней (16-20 июня), прогревом поверхности в дневное время и значительным радиационным выхолаживанием – в ночное становятся заметны температурные контрасты между повышенными и пониженными элементами микрорельефа. В дневные часы северная мочажина нагревается до  $+32.4 \div +33.5^{\circ}\text{C}$ , что несколько больше, чем температура поверхности на южной мочажине ( $+29.3 \div +31.2^{\circ}\text{C}$ ) и на гряде ( $+29.5 \div +32.8^{\circ}\text{C}$ ). Однако даже в полдень на гряде есть области с пониженной температурой поверхности ( $+18.8 \div +25.1^{\circ}\text{C}$ ), вероятно, находящиеся в тени деревьев. Ночью мочажина, как правило, теплее гряды. Температура поверхности южной мочажины ( $+12.5 \div +15.3^{\circ}\text{C}$ ) выше, чем северной ( $+6.2 \div +9.3^{\circ}\text{C}$ ). Как и днем, в ночные часы температура поверхности гряды неоднородна и варьирует в диапазоне от  $+7.3$  до  $+12.1^{\circ}\text{C}$ , но, однако, ниже, чем температура поверхности северной мочажины. Данные закономерности распределения температуры сохраняются и в верхних слоях почвы на глубинах 5 см (Рис. 3б) и 10 см (Рис. 3в).

На глубине 20 см от поверхности (Рис. 3г) на мочажине суточный ход температуры в значительной степени сглаживается, его амплитуда снижается до  $1^{\circ}\text{C}$ , а на гряде амплитуда суточного хода составляет  $5$ - $7^{\circ}\text{C}$ . Днем температура почвы на гряде становится выше, чем на мочажине. Ночью закономерности, описанные выше для температуры поверхности, сохраняются: гряда холоднее мочажины. С глубины 40 см во всех пунктах трансекты М-Г-М отсутствуют суточные колебания температуры и становятся значимо видны различия в температуре почвы разных мочажин (Рис. 3д). Южная мочажина теплее северной на  $1.5$ - $2^{\circ}\text{C}$ . На гряде выявляются различия в температуре северного и южного склонов. Северный склон гряды холоднее южного, и в целом температура почвы на гряде меньше, чем на мочажине.



**Рис. 3.** Временной ход температуры почвы транsekты М-Г-М в июне 2022 г. на поверхности (а) и глубинах 5 (б), 10 (с), 20 (д), 60 (е) см. По горизонтальной оси представлено время, по вертикальной оси – расстояние вдоль транsekты от пункта № 2 (в метрах). Пунктирными красными линиями показана граница гряды. В верхней части рисунка – северная мочажина, в нижней части – южная мочажина (см. Рис. 1). Цветом указана температура поверхности или температура почвы.

**Fig. 3.** Time course of soil temperature along the H-R-H transect in June 2022 on the surface (a) and at depths of 5 (b), 10 (c), 20 (d), 60 (e) cm. Dashed lines indicate the ridge boundary.

Анализ данных измерений за 2020-2022 гг. выявил устойчивый характер пространственного распределения температуры поверхности на грядово-мочажинном комплексе. В тёплый сезон (апрель – октябрь) поверхность мочажин в среднем за сутки постоянно теплее, чем поверхность гряд. Эта закономерность обусловлена прежде всего большей теплоёмкостью переувлажнённого торфа мочажин, который медленнее прогревается днём, но и медленнее остывает ночью, а также, возможно, микроклиматическими различиями, такими как затенение древостоем на грядах и разное альbedo поверхности. В холодный сезон (ноябрь – март) суточный ход температуры поверхности практически отсутствует, однако различия между элементами микрорельефа сохраняются: мочажины остаются теплее гряд.

Значимой причиной температурных различий является разная мощность снежного покрова. В начале холодного сезона в понижениях микрорельефа (мочажинах) аккумулируется более мощная снежная толща, чем на повышениях (грядах). Снег выравнивает поверхность болота, сглаживая первоначальные неровности рельефа, и его теплоизолирующая роль над грядами оказывается слабее из-за меньшей мощности. При этом в конце снежного периода происходит инверсия глубин снежного покрова: на мочажинах обнаруживаются наименьшие значения, а на облесенных грядах – наибольшие. В этом случае теплоизолирующие свойства снега защищают гряды от прямого

воздействия солнечной радиации и более теплых температур воздуха, характерных для начала весны. В результате поверхность гряд сильнее охлаждается, что и приводит к формированию устойчивого термического контраста в зимний период. Таким образом, выявленный пространственный паттерн температур сохраняется круглогодично, но его физические движущие механизмы различаются по сезонам: летом он определяется в основном теплофизическими свойствами субстрата и радиационным балансом, а зимой – особенностями распределения и теплоизолирующей роли снежного покрова.

**Средние месячные температуры.** Средние значения и стандартное отклонение для всех пунктов наблюдений и всех глубин рассчитаны для каждого месяца по средним суточным значениям, полученным из ежечасных измерений. В таблице приведены средние месячные характеристики температуры для некоторых глубин для двух наиболее контрастных пунктов на гряде и мочажине.

Максимальные значения средней месячной температуры поверхности были зафиксированы в июле 2020 г., который оказался самым тёплым месяцем за период наблюдений (Табл.). Максимальный прогрев поверхности был зафиксирован в центре северной мочажины (пункт № 2), где средняя месячная температура составила  $+21.2 \pm 3.1^\circ\text{C}$ , что указывает на значительные межсуточные колебания. С глубиной в этом пункте температура закономерно и относительно плавно уменьшалась: до  $+19.4 \pm 2.1^\circ\text{C}$  на 10 см,  $+15.3 \pm 1.6^\circ\text{C}$  на 40 см и  $+12.9 \pm 1.4^\circ\text{C}$  на 60 см. Более плавное затухание тепла с глубиной в мочажине объясняется высокой теплопроводностью и теплоёмкостью водонасыщенного торфа, который эффективно передаёт и аккумулирует тепловую энергию. Самая тёплая точка на гряде была зарегистрирована в пункте № 4, где средняя температура поверхности в тот же июль составила  $+19.6 \pm 3.4^\circ\text{C}$ , что уже на  $1.6^\circ\text{C}$  ниже, чем на мочажине. Для гряды характерно более резкое падение температуры с глубиной. На глубине 10 см она составляла  $+17.4 \pm 2.4^\circ\text{C}$ , на 40 см –  $+12.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ , а на 60 см – всего  $+10.7 \pm 1.3^\circ\text{C}$ . Такое интенсивное рассеяние тепла обусловлено теплоизолирующими свойствами сухого, аэрированного торфа гряды, который препятствует передаче тепла вглубь торфяной толщи. Сравнение показывает, что на всех анализируемых глубинах (до 60 см) почва в мочажине была существенно теплее, чем на гряде, причём разница увеличивалась с глубиной: от  $1.6^\circ\text{C}$  на поверхности до  $2.2^\circ\text{C}$  на отметке 60 см. Это подтверждает, что водонасыщенная мочажина выступает в роли более эффективного и глубокого аккумулятора летнего тепла. Также стоит отметить, что аналогичные измерения на южной мочажине (пункт № 10) демонстрируют сходную картину. Полученные количественные данные наглядно иллюстрируют, как контрастные физические свойства торфа (теплопроводность и теплоёмкость), определяемые степенью обводнённости, формируют принципиально разные глубинные термические режимы соседствующих микроландшафтов в один и тот же период, что имеет ключевое значение для понимания биохимических и микробиологических процессов в почве.

Анализ минимальных температур чётко демонстрирует экстремальные различия в зимнем термическом режиме между элементами микрорельефа. Абсолютный минимум средней месячной температуры поверхности ( $-9.8 \pm 3.2^\circ\text{C}$ ) был зарегистрирован в декабре 2020 года на вершине гряды (пункт № 5). Значительное стандартное отклонение указывает на заметные вариации суточных температур при небольшой высоте снежного покрова. В то же время на поверхности мочажины (пункты № 2 и № 10) температура была существенно выше:  $-1.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$  и  $-0.9 \pm 0.3^\circ\text{C}$  соответственно. Эта разница, достигающая почти  $9^\circ\text{C}$ , в первую очередь объясняется отопляющим воздействием болотных вод и неравномерным распределением снежного покрова. В первой половине снежного сезона на возвышенной гряде снега накапливается меньше, и он легче сдувается ветром, что лишает почву эффективной теплоизоляции и приводит к сильному выхолаживанию. В понижениях мочажин формируется более мощная и устойчивая снежная толща, которая надёжно защищает почву от морозов, поддерживая температуру поверхности вблизи точки замерзания.

Характерным для зимнего периода является увеличение температуры почвы с глубиной. Так, в декабре 2020 г. на гряде (пункт № 5) глубина промерзания была чуть меньше 40 см. На глубине 10 см температура была отрицательной ( $-7.9 \pm 2.9^\circ\text{C}$ ), на границе промерзания (40 см) приближалась к нулю ( $+0.05 \pm 0.7^\circ\text{C}$ ), а на глубине 60 см становилась положительной ( $+1.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$ ). На мочажине (пункт № 10) глубина промерзания не превышала 20 см, что соответствует примерно половине от слоя промерзания на гряде. Соответственно, на мочажине на глубине 10 см температура была отрицательной ( $-0.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ), а на 40 и 60 см составляла  $+1.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$  и  $+2.7 \pm 0.4^\circ\text{C}$ .

**Таблица.** Статистические характеристики (среднемесячное значение и стандартное отклонение в °С) температуры почвы на гряде (пункт № 5) и в мочажине (пункт № 10). Число наблюдений – от 672 до 744. Шаг измерений – 1 час. Стандартное отклонение рассчитано по средним суточным данным. Цветом (синий и красный) выделены минимум и максимум для каждого датчика

**Table.** Statistical characteristics (monthly mean and standard deviation in °C) of soil temperature in the ridge (point №5) and the hollow (point №10). Number of observations: 672 to 744. Measurement interval: 1 hour. Standard deviation calculated from daily data. Minimum and maximum for each sensor are highlighted (blue and red).

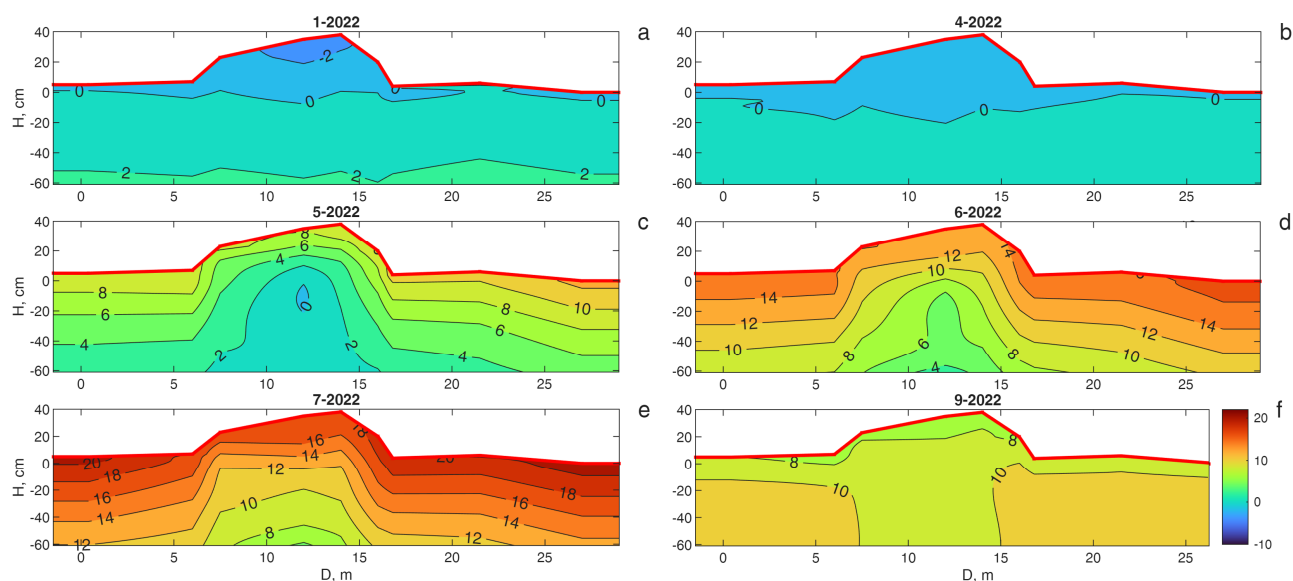
Глубина	0 см	10 см	60 см	0 см	10 см	60 см		0 см	10 см	60 см	0 см	10 см	60 см
Месяц	Гряда (п. № 5)			Мочажина (п. № 10)				Гряда (п. № 5)			Мочажина (п. № 10)		
	Среднее, °С							Стандартное отклонение, °С					
<b>2020</b>													
Июль	18.0	17.8	11.3	21.1	19.1	11.3		3.5	2.9	1.6	2.8	2.0	1.3
Август	16.0	16.3	12.1	17.5	17.2	13.3		3.0	2.5	0.3	2.9	2.0	0.2
Сентябрь	8.9	9.5	10.6	10.3	11.2	11.9		2.7	2.3	0.8	2.4	2.0	0.9
Октябрь	1.5	2.6	7.2	2.6	4.1	8.1		2.6	2.5	1.2	2.3	2.1	1.3
Ноябрь	-4.1	-2.4	4.1	-0.2	0.6	4.5		3.5	2.6	0.6	0.4	0.4	0.7
Декабрь	-9.8	-7.9	1.9	-0.9	-0.2	2.7		3.7	2.9	0.6	0.3	0.2	0.4
<b>2021</b>													
Январь	-7.8	-6.4	0.6	-1.0	-0.5	1.8		1.6	1.2	0.2	0.2	0.1	0.2
Февраль	-5.5	-4.5	0.1	-0.8	-0.5	1.3		1.7	1.3	0.1	0.4	0.2	0.1
Март	-3.6	-2.9	0.0	-0.5	-0.3	1.0		1.7	1.4	0.0	0.3	0.2	0.1
Апрель	1.1	0.0	0.0	2.9	0.8	1.2		1.9	0.3	0.0	3.1	1.3	0.8
Май	10.8	8.8	0.0	13.5	10.7	4.4		4.4	4.5	0.0	3.7	3.6	2.2
Июнь	14.0	12.7	1.0	16.2	13.7	7.0		4.0	3.7	1.2	3.4	2.8	1.5
Июль	15.9	15.3	9.2	18.1	16.5	10.1		3.6	3.3	0.9	3.0	2.4	1.3
Август	16.6	16.7	11.3	18.1	17.3	12.5		3.4	2.9	0.7	2.5	1.5	0.5
Сентябрь	6.0	6.5	9.1	8.2	9.2	11.0		4.2	3.8	1.4	3.6	3.3	1.3
Октябрь	1.6	2.4	5.6	2.4	3.2	6.9		1.8	1.5	0.7	1.4	1.1	0.8
Ноябрь	-3.7	-2.0	2.9	0.0	0.7	4.2		2.8	1.9	0.7	0.1	0.1	0.6
Декабрь	-4.7	-3.2	1.3	-0.1	0.3	2.9		1.3	0.8	0.2	0.0	0.1	0.3
<b>2022</b>													
Январь	-3.9	-2.8	0.7	-0.1	0.1	2.2		0.8	0.6	0.1	0.0	0.0	0.2
Февраль	-3.6	-2.6	0.5	-0.1	0.0	1.8		1.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1
Март	-3.5	-2.5	0.3	-0.1	0.0	1.5		1.8	1.3	0.1	0.0	0.0	0.1
Апрель	-0.3	-0.3	0.1	0.0	0.1	1.2		0.6	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Май	8.8	6.2	0.2	12.6	11.3	5.0		5.3	5.4	0.3	5.1	4.7	2.9
Июнь	13.4	13.1	5.1	16.6	16.3	10.6		4.5	4.2	2.2	4.0	3.1	1.1
Июль	17.3	17.2	9.6	20.9	19.9	13.5		3.0	2.8	1.1	3.1	2.6	1.1
Август	15.0	15.1	10.6	16.5	16.8	14.2		2.8	2.5	0.2	3.3	2.1	0.5
Сентябрь	7.0	7.6	9.3	7.7	9.9	11.8		3.8	3.5	0.7	3.6	2.5	1.0
Октябрь	2.6	3.3	6.7	2.3	4.4	8.0		2.0	1.9	0.6	1.8	1.4	0.8

В течение зимы происходит постепенное охлаждение почвы, и фронт промерзания медленно опускается вглубь торфяной залежи. Глубина и продолжительность существования сезонно-мерзлого слоя существенно варьируют в зависимости от суровости зимних условий, прежде всего от

температурного режима и мощности снежного покрова. Так, зимой 2020/2021 гг. из-за сочетания крайне низких температур воздуха и недостаточного изолирующего слоя снега охлаждение почвы было особенно интенсивным и глубоким. К началу марта 2021 г. глубина промерзания на мочажине достигала 30 см. На гряде же, где снежный покров был ещё тоньше, а торф более сухим, промерзание оказалось максимальным и пролонгированным во времени: наибольшая глубина (немногом более 60 см) была зафиксирована 30-31 мая 2021 г. Эта задержка связана с тем, что промёрзший торф гряды, будучи хорошим теплоизолятором, очень медленно прогревался сверху, а оттаивание снизу (за счет притока тепла от глубоких слоев торфа) не наблюдалось. В следующую, значительно более мягкую зиму 2021/2022 гг., когда отрицательные температуры были менее экстремальными, а снега выпало больше, глубина промерзания оказалась существенно меньше. На мочажине наибольшее промерзание составило лишь около 12 см (по данным на 22 апреля 2022 г.), а на гряде – около 55 см (16 мая 2022 г.). Таким образом, контраст между двумя зимами наглядно демонстрирует ключевую роль двух факторов: температуры воздуха, которая определяет скорость выхолаживания, и мощности снежного покрова, который выступает в роли критически важного теплоизолятора, защищающего почву от глубокого промерзания. При этом разница в глубине промерзания между мочажинной и грядой в любую зиму сохраняется, что однозначно указывает на определяющее влияние микрорельефа и связанных с ним условий увлажнения и снегонакопления на формирование термического режима почв.

Таким образом, не только поверхность, но и вся толща торфа на мочажине в зимний период значительно теплее, чем на гряде. Более высокая температура и меньшая глубина промерзания в мочажине также связаны с повышенной влажностью торфа: высокая теплоёмкость воды и выделение скрытой теплоты при фазовом переходе в лёд смягчают падение температуры.

На рисунке 4 представлено пространственное распределение средней температуры верхних слоев почвы вдоль трансекты М-Г-М в отдельные месяцы исследуемого периода. Изотермы для всех месяцев показаны в приложении 1.



**Рис. 4.** Средняя месячная температура почвы на трансекте М-Г-М в 2022 г.: январь (а), апрель (б), май (с), июнь (д), июль (е), сентябрь (ф). По вертикальной оси – превышение поверхности относительно пункта № 2 (см), по горизонтальной оси – удаление вдоль трансекты от пункта № 2 (м), цветом обозначена температура торфа (°С).

**Fig. 4.** Monthly average soil temperature along the H-R-H transect in 2022. January (a), April (b), May (c), June (d), July (e), September (f). Vertical axis - surface elevation relative to point No. 2 (in cm); horizontal axis - distance along the transect from point No.2 (in meters); color scale indicates peat temperature (°C).

В холодный период, например в марте (Рис. 4а, б), распределение температуры в почве типично для сезона промерзания: температура увеличивается с глубиной, а изолинии располагаются практически горизонтально. Глубина промерзания, определяемая нулевой изотермой, на мочажине составляет 5-10 см. Под грядой мёрзлый слой проникает глубже, опускаясь на 5-10 см относительно мочажинны, что в абсолютных значениях соответствует 40-45 см от поверхности гряды. Более низкая

температура почвы на гряде в этот период объясняется её возвышенным положением, которое приводит к меньшей мощности снежного покрова. Поскольку снег является эффективным теплоизолятором, его меньшая толщина над грядой обуславливает усиленное выхолаживание поверхности и верхних слоёв торфа.

С началом весеннего снеготаяния в апреле запускается активный прогрев торфяной залежи. В этот период критическую роль начинают играть физические свойства торфа. Рыхлый, хорошо аэрированный торф гряды, поры которого заполнены воздухом, обладает низкой теплопроводностью и эффективно изолирует нижележащие горизонты от прогрева. К тому же большая глубина снежного покрова на грядах в конце снегового периода выступает в роли изолятора, препятствуя нагреву почвы из атмосферы. Напротив, в обводнённой мочажине поры торфа заполнены водой (влажность торфа до 99%), которая обладает высокой теплоёмкостью и теплопроводностью, что обеспечивает более медленное, но глубокое и аккумулированное поступление тепла. В результате уже к маю (Рис. 4в) весь почвенный профиль на мочажине становится существенно теплее, чем на гряде.

Сложившийся термический контраст сохраняется на протяжении всего лета, например в июле (Рис. 4д): как поверхностные, так и глубинные слои почвы на мочажине остаются теплее, чем на гряде. При этом в оба теплых сезона отмечается устойчивая разница между мочажинами: южная мочажина прогрета сильнее северной на 1-2°C, что, вероятно, связано с её большей обводнённостью и, как следствие, более высокой теплоёмкостью и замедленной теплоотдачей.

Осенью (Рис. 4е, сентябрь) начинается процесс остывания торфяной залежи. В это время верхние слои торфа на повышенных элементах микрорельефа (гряды) остывают быстрее, чем в понижениях (мочажина), что восстанавливает и усиливает вертикальный температурный градиент.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили выявить четкие закономерности пространственно-временной изменчивости температуры в торфяной толще грядово-мочажинного комплекса. Анализ данных трехлетнего мониторинга температурного режима торфяной залежи грядово-мочажинного болотного комплекса подтверждает, что переувлажнённые участки болота (мочажина) в среднем теплее, чем повышенные элементы микрорельефа (гряды), где уровень грунтовых вод находится глубже. Эта закономерность носит устойчивый сезонный характер, однако её физические механизмы различаются в тёплый и холодный периоды года. В тёплый сезон основной причиной является разница в теплофизических свойствах торфа. Водонасыщенный торф мочажин обладает высокой объёмной теплоёмкостью и теплопроводностью. Это приводит к тому, что он медленно, эффективно и с большим запаздыванием аккумулирует поступающее тепло, но также медленно его отдаёт. В результате дневной прогрев проникает глубже, а ночное охлаждение оказывается менее интенсивным. На грядах торф более аэрированный, его поры заполнены воздухом, который является хорошим теплоизолятором. Это создаёт эффект «обратного термоса»: верхний слой быстро и сильно прогревается днём и так же быстро остывает ночью, в то время как передача тепла вглубь и из глубины затруднена. Этому также способствуют процессы испарения с поверхности мочажин, требующие значительных затрат тепла (скрытая теплота парообразования), что дополнительно сдерживает их дневной перегрев по сравнению с сухими грядами.

Зимой главным механизмом, формирующим контраст, становится снежный покров. В начале снежного периода в понижениях рельефа накапливается более мощная снежная толща, выполняющая роль эффективного теплоизолятора и защищающая почву от глубокого промерзания. На возвышенных грядах снег сдувается ветром, уплотняется или подвергается сублимации, его слой тоньше, поэтому почва здесь сильнее и быстрее охлаждается, а глубина промерзания увеличивается. Важную роль в мочажинах играет и высокая теплота фазового перехода воды в лёд, которая выделяет значительное количество энергии при замерзании и замедляет процесс охлаждения.

Указанное различие в пространственном распределении температуры нарушается лишь в отдельные летние дни на определённой глубине (5-10 см), когда хорошо прогретый за день и теплоизолированный сухой торф гряды может оказаться теплее, чем торф мочажина, который за счёт высокой теплопроводности отводит часть тепла в более глубокие, холодные слои, а также теряет его на испарение. Эта ситуация является временной и локальной, не отменяющей общей годовой тенденции. Таким образом, термический режим болотного комплекса формируется в результате сложного взаимодействия микрорельефа, определяющего распределение влаги и снега, и

контрастных теплофизических свойств водонасыщенного и сухого торфа на разных стадиях их сезонного теплообмена.

Полученные результаты важны для моделирования теплопереноса и углеродного цикла в гетерогенных болотных ландшафтах. Результаты обосновывают, что усреднение параметров (влажности, теплопроводности, мощности снега) для гетерогенного комплекса «гряда-мочажина» может привести к значительным ошибкам в расчетах температурного режима и, как следствие, темпов разложения торфа и скорости потока парниковых газов. А также выявленные сезонно-специфичные механизмы (доминирование теплофизических свойств торфа летом и снежного покрова зимой) указывают на необходимость использования в моделях отдельных параметров для сезонов и элементов микрорельефа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

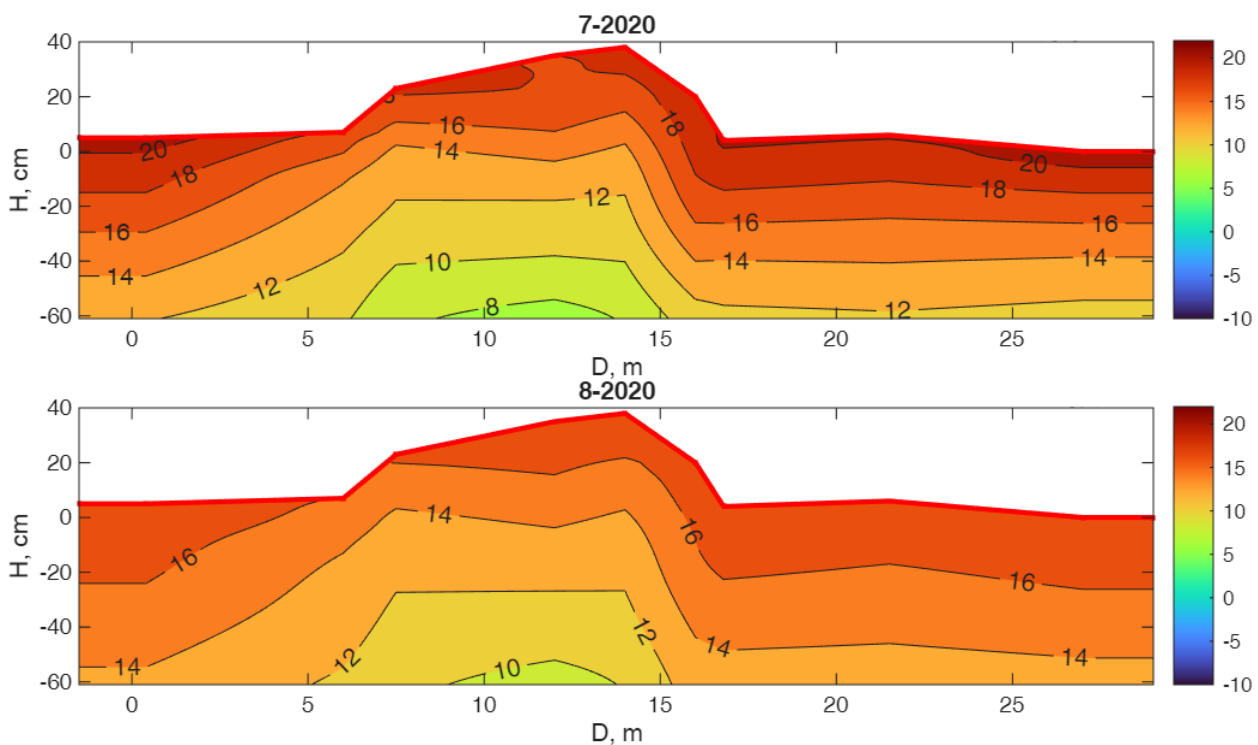
Обработка данных выполнена в рамках госбюджетного задания ИМКЭС СО РАН FWRG-2026-0010. Экспериментальные исследования в ХМАО-Югре проведены с использованием инфраструктуры карбонового полигона «Мухрино» в рамках государственного задания «Карбоновые полигоны» (рег. № 122122800014-7).

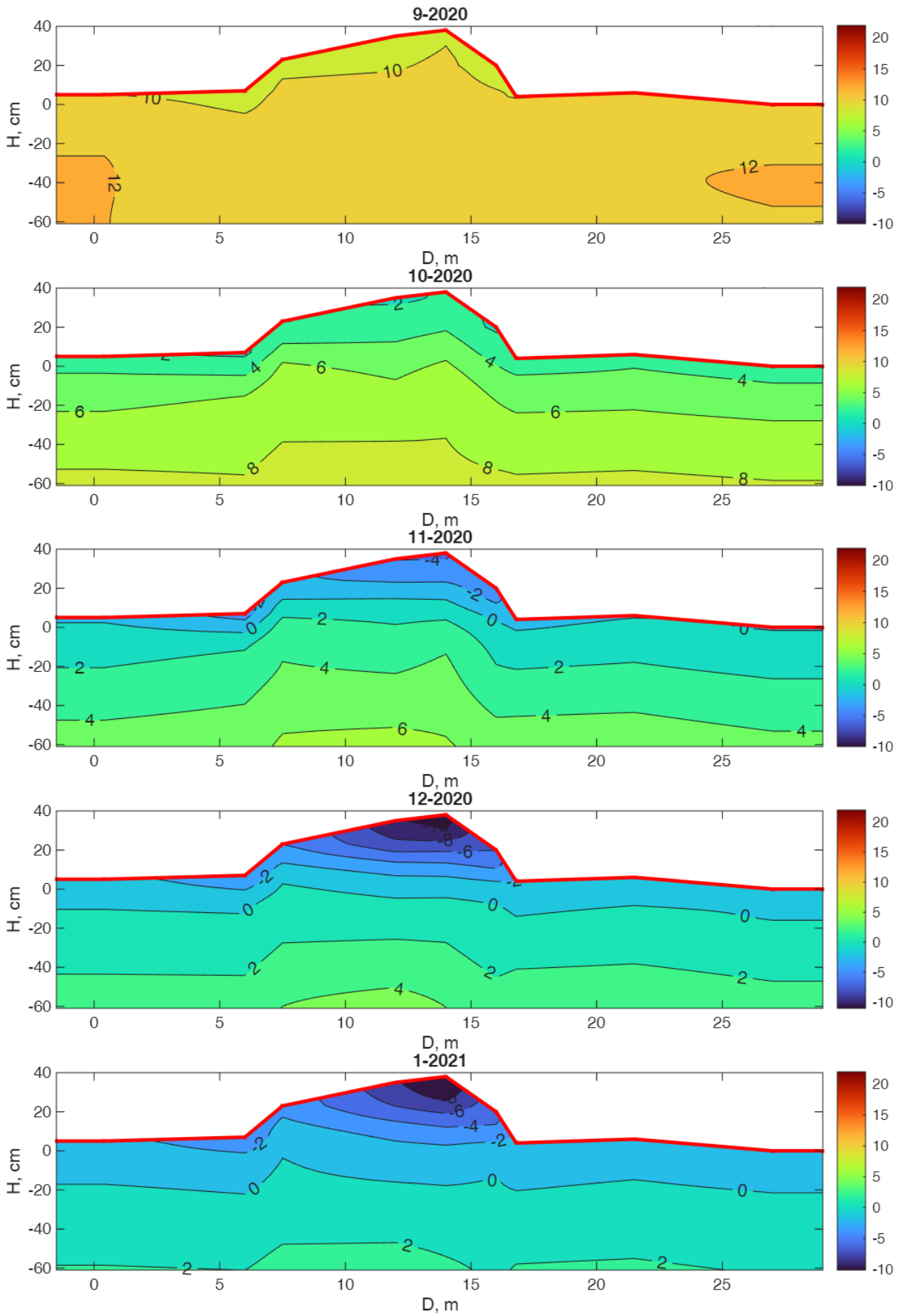
## ПРИЛОЖЕНИЕ:

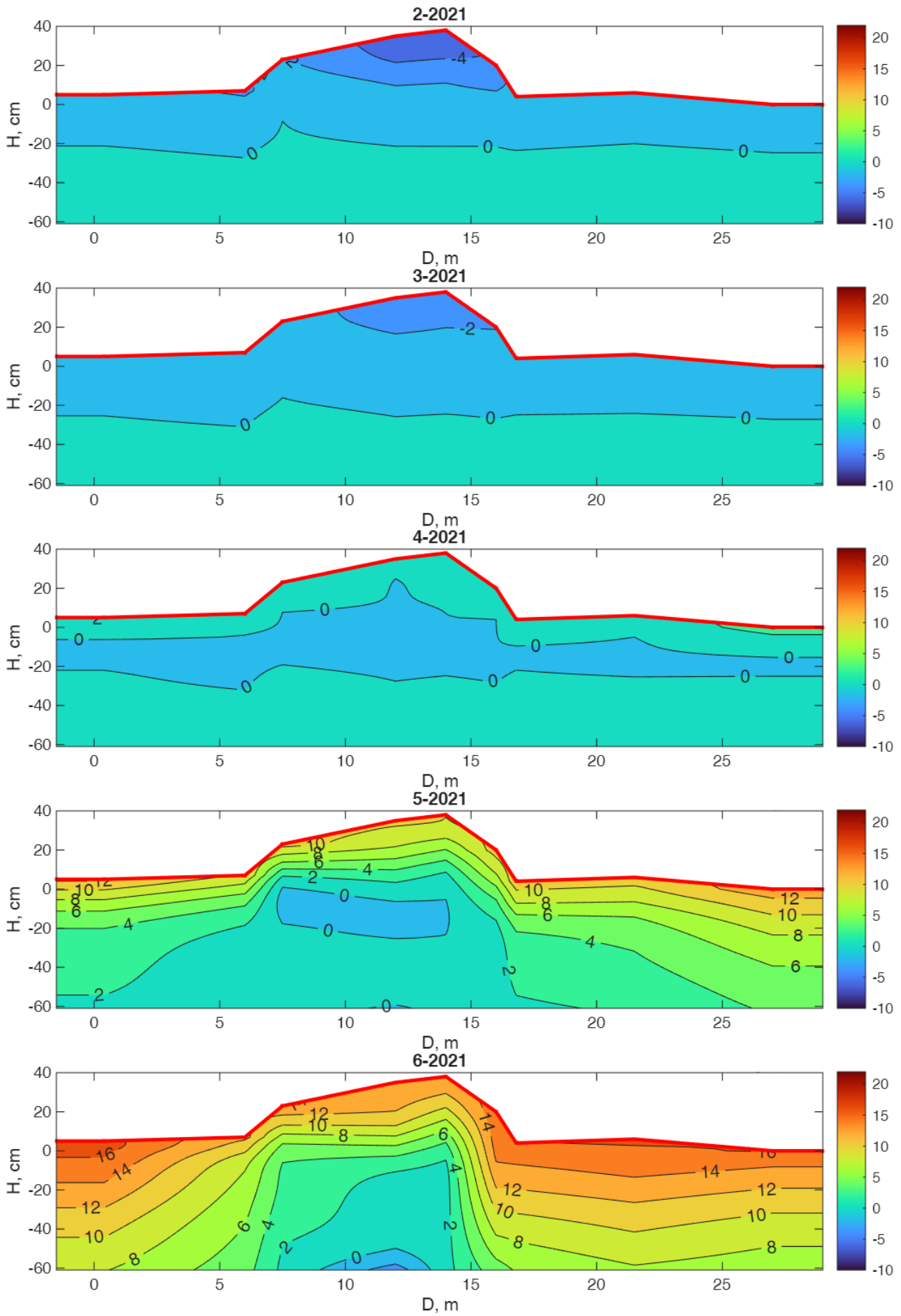
Изотермы средних месячных температур почвы на трансекте М-Г-М с июля 2020 г. по октябрь 2022 г. Дата и месяц указаны в заголовке.

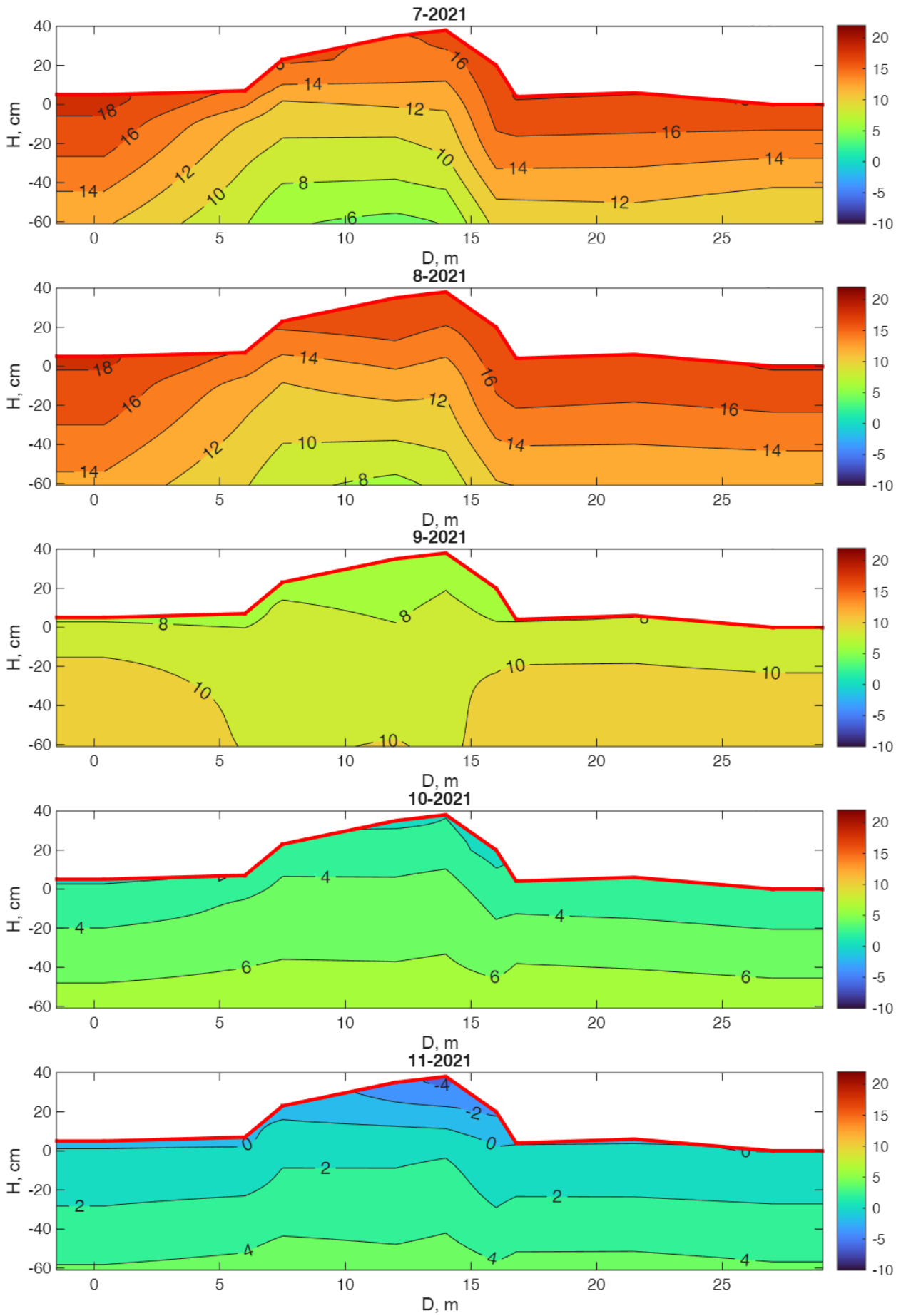
## APPENDIX:

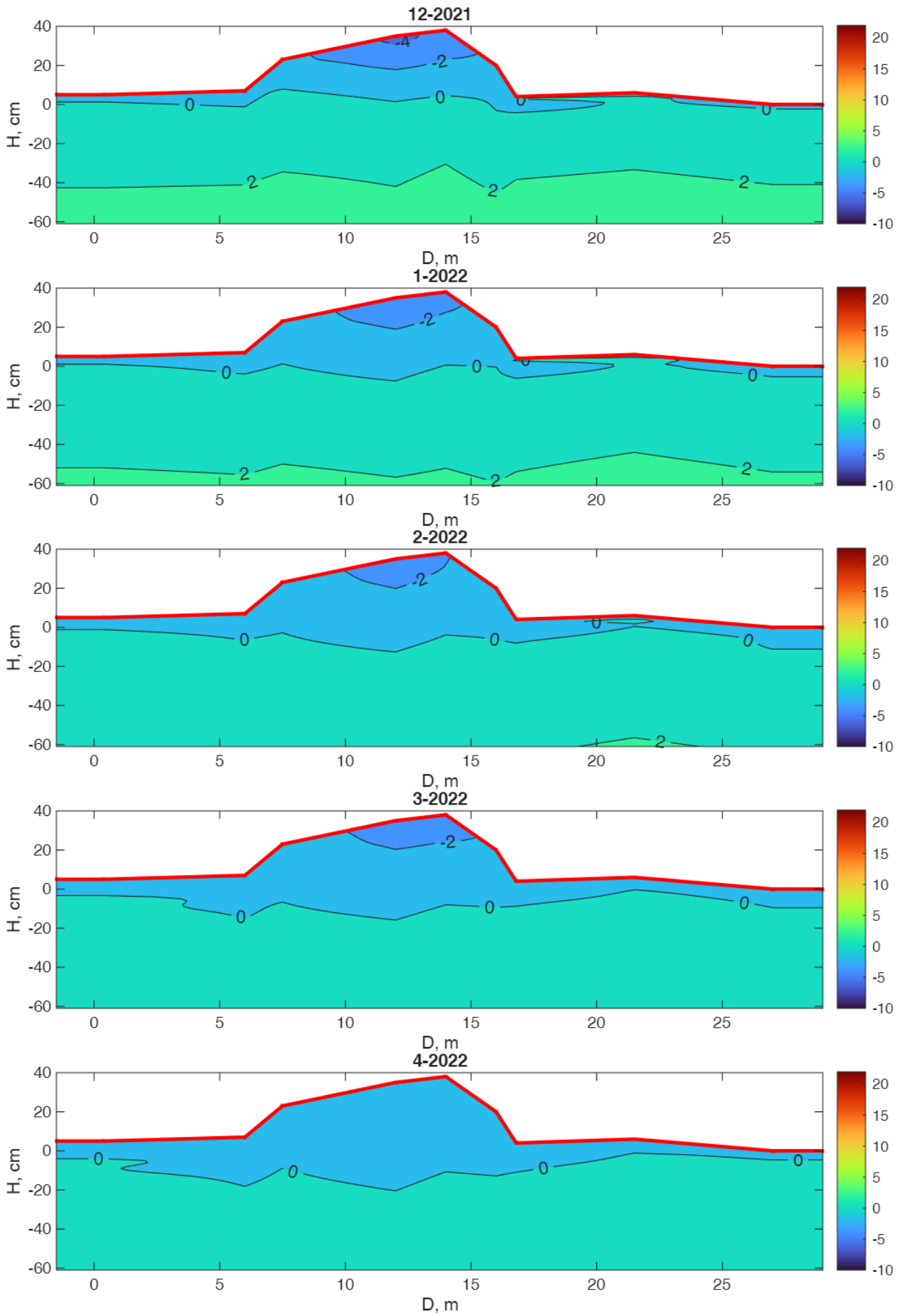
Isotherms of mean monthly soil temperatures along transect M-G-M from July 2020 to October 2022. Date and month are indicated in the title.

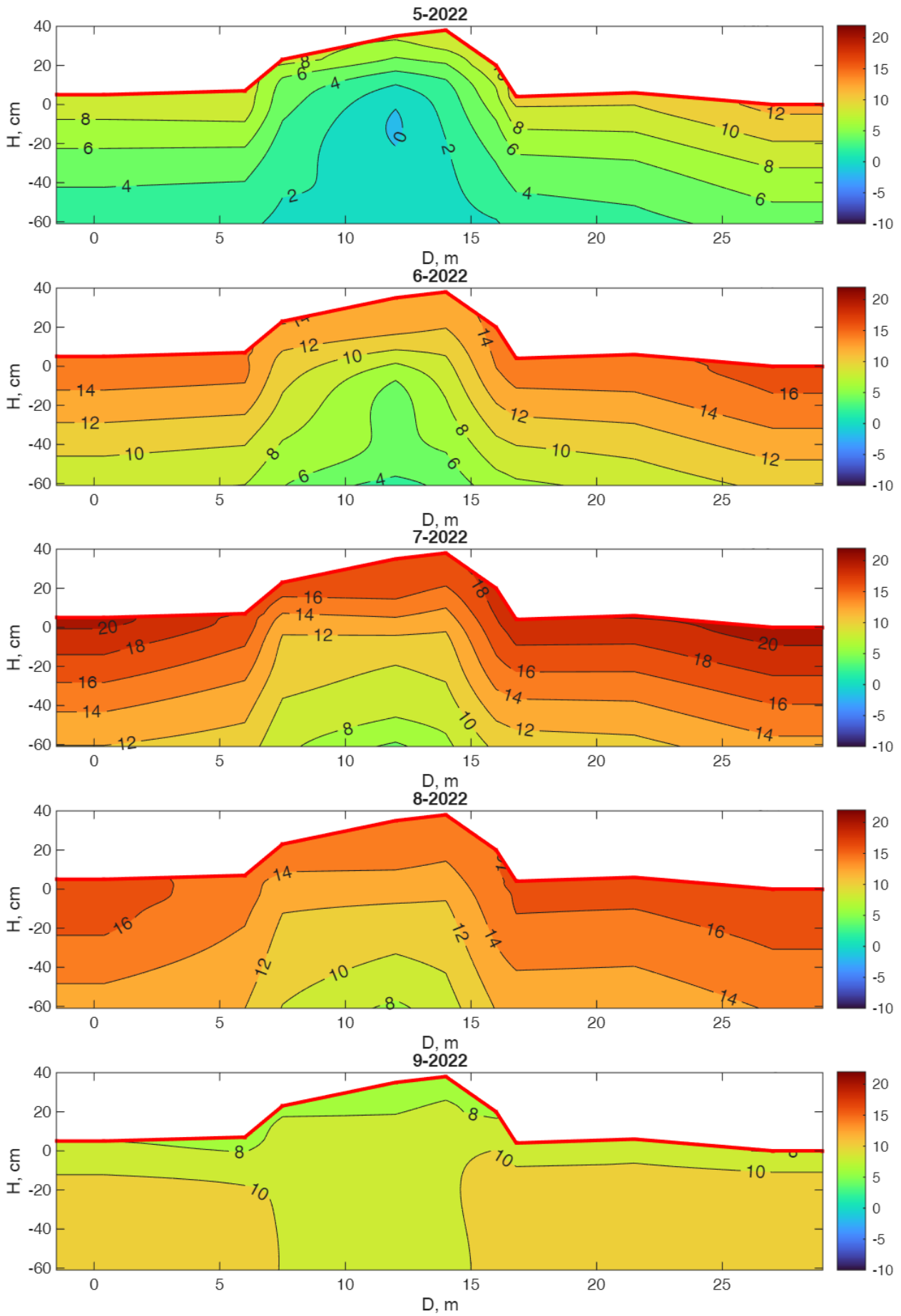


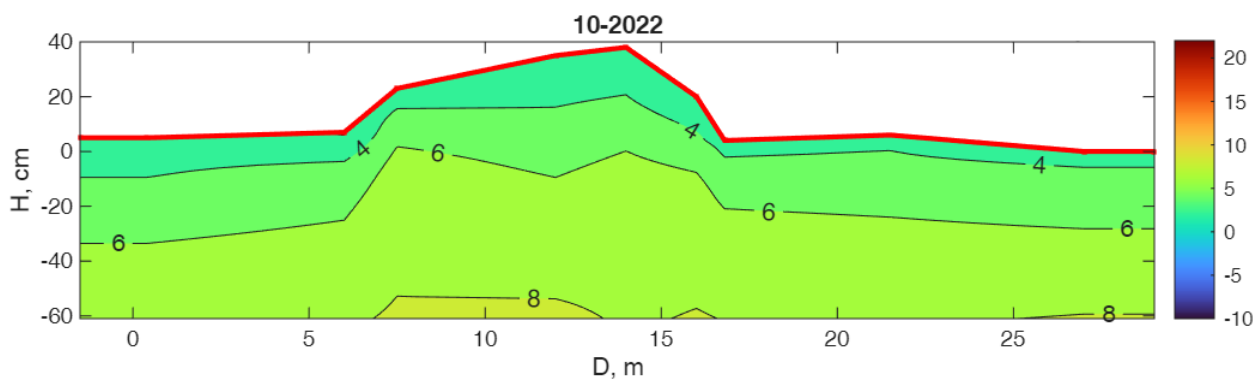












## ЛИТЕРАТУРА

- Aalto J., Tyystjärvi V., Niittynen P., Kemppinen J., Rissanen T., Gregow H., Luoto M. 2022. Microclimate temperature variations from boreal forests to the tundra. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323: 109037. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109037
- Amon L., Tsyganov A.N., Zarov E.A., Burkanova E., Vassiljev J., Kulkov M.G., Krivokorin I., Chernyshov V.A., Mazei N.G., Salakhidinova G.T., Gulina A., Kuzmin Y., Maze Y.A., Lapshina E.D. 2025. Regional and local drivers of vegetation and humidity dynamics in Western Siberia during the Holocene: A case study of Mukhrino mire. *Holocene*. DOI: 10.1177/09596836251387252
- Baird A.J., Belyea L.R., Comas X., Reeve A.S., Slater L.D. 2010. *Carbon cycling in northern peatlands*. Geophysical Monograph Series, 184. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Bridgman S.D., Pastor J., Updegraff K., Malterer T.J., Johnson K., Harth C., Chen J. 1999. Ecosystem control over temperature and energy flux in northern peatlands. *Ecological Applications*, 9(4): 1345-1358. DOI: 10.1890/1051-0761(1999)09[1345:ECOTAE]2.0.CO;2
- Briones M.J.I., Juan-Ovejero R., McNamara N.P., Ostle N.J. 2022. Microbial "hotspots" of organic matter decomposition in temperate peatlands are driven by local spatial heterogeneity in abiotic conditions and not by vegetation structure. *Soil Biology and Biochemistry*, 165: 108501. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108501
- Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Description of the dataset of routine data on basic meteorological parameters at stations in Russia (in Russian) [Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России] <http://meteo.ru/data/basic-parameters/> [Last accessed 09.2025].
- Chaudhary N., Miller P.A., Smith B. 2018. Biotic and Abiotic Drivers of Peatland Growth and Microtopography: A Model Demonstration. *Ecosystems*, 21(6): 1196-1214. DOI: 10.1007/s10021-017-0213-1
- Cechin D.G., Repina I.A., Artamonov A.Y., Drozd I.D., Dyukarev E.A., Kazantsev V.S., Krivenok L.A., Larina A.V., Pashkin A.D., Shmonin K.N., Stepanenko V.M., Varentsov M.I. 2024. Quantifying Spatial Heterogeneities of Surface Heat Budget and Methane Emissions over West-Siberian Peatland: Highlights from the Mukhrino 2022 Campaign. *Forests*, 15(1): 102. DOI: 10.3390/f15010102
- Clymo R.S., Turunen J., Tolonen K. 1998. Carbon accumulation in peatland. *Oikos*, 81(2): 368-388.
- Dimitrov D.D., Grant R.F., Lafleur P.M., Humphreys E.R. 2010. Modeling Peat Thermal Regime of an Ombrotrophic Peatland with Hummock-Hollow Microtopography. *Soil Science Society of America Journal*, 74(4): 1406-1425. DOI: 10.2136/sssaj2009.0288
- 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. 2021. 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. DOI: 10.3390/land10080824
- Dyukarev E.A., Veretennikova E.E., Sabrekov A.F., Kulik A.A., Zarov E.A. 2024. Methane and carbon dioxide fluxes correlation according to automatic chamber observations at the Mukhrino bog ridge and hollow complex. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 15(4): 276-288. DOI: 10.18822/edgcc636456
- Dyukarev E.A., Zarov E.A., Kulik A.A., Dmitrichenko A.A., Lapshina E.D. 2025. Chapter 2.2.1. Carbon dioxide fluxes in the mire ecosystems of the "Mukhrino" carbon polygon. 170-176. In: *"Carbon polygons: monitoring, geoinformation systems, sequestration technologies"*. Edited by S.K. Gulev and A.V. Olchev. Moscow: Nauchnyi Mir. 420 p. (in Russian) [Дюкарев Е.А. Заров Е.А., Кулик А.А., Дмитриченко А.А., Лапшина Е.Д. Глава 2.2.1. Потоки углекислого газа в болотных экосистемах карбонового полигона «Мухрино» с.170-176. В монографии «Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии». Под редакцией С.К. Гулева и А.В. Ольчева». Москва: Научный мир, 2025. 420 с.]
- Gorham E. 1991. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1(2): 182-195.
- Graham J.A., Hartssock J.A., Vitt D.H., Wieder R.K., Gibson J.J. 2016. Linkages between spatio-temporal patterns of environmental factors and distribution of plant assemblages across a boreal peatland complex. *Boreas*, 45(2): 207-219. DOI: 10.1111/bor.12144
- Horsák M., Horsáková V., Polásek M., Coufal R., Hájková P., Hájek M. 2021. Spring water table depth mediates within-site variation of soil temperature in groundwater-fed mires. *Hydrological Processes*, 35(7): e14293. DOI: 10.1002/hyp.14293
- 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<sub>2</sub> Exchange in the West Siberian Boreal Bog. *Land*, 12: 566. DOI: 10.3390/land12030566

IPCC. 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* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Kattsov V.M. (ed.) 2022. *The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. St. Petersburg: Naukoemkie Tekhnologii. 676 p. (In Russian) [Катцов В.М. (ред.) 2022. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии. 676 с.]

Keiser A.D., Davis C.L., Smith M., Bell S.L., Hobbie E.A., Hofmockel K.S. 2025. Depth and microtopography influence microbial biogeochemical processes in a forested peatland. *Plant and Soil*, 509(1): 833-846. DOI: 10.1007/s11104-024-06895-1

Kiselev M.V., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kurakov S.A., Kurakova P.S., Makeev E.A. 2018. Automatic meteorological measuring systems for microclimate monitoring. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 190: 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/190/1/012031

Kulik A.A., Zarov E.A. 2024. The influence of the hydrometeorological factors on the CO<sub>2</sub> fluxes from the oligotrophic bog surface. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(4): 249-263. DOI: 10.18822/edgcc624160

Kupriyanova 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

Lapshina E.D., Zarov E.A. 2023. Stratigraphy of peat deposits and mire development in the southern part of the forest zone of Western Siberia in Holocene. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(2): 70-101. DOI: 10.18822/edgcc568688

Leonard R., Moore P., Krause S., Devito K.J., Petrone G.R., Mendoza C., Waddington J.M., Kettridge N. 2021. The influence of system heterogeneity on peat-surface temperature dynamics. *Environmental Research Letters*, 16(2): 024054. DOI: 10.1088/1748-9326/abd4ff

Leonard R.M., Kettridge N., Devito K.J., Petrone R.M., Mendoza C.A., Waddington J.M., Krause S. 2018. Disturbance Impacts on Thermal Hot Spots and Hot Moments at the Peatland-Atmosphere Interface. *Geophysical Research Letters*, 45(1): 185-193. DOI: 10.1002/2017GL075974

Litvinov L.V., Zarov E.A., Ivanova I.S. 2025. Hydrochemical differentiation in bog ecosystems. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(2): 69-80. DOI: 10.18822/edgcc677932

López-Blanco E., Väisänen M., Salmon E., Jones C.P., Schmidt N.M., Marttila H., Lohila A., Juutinen S., Scheller J., Christensen T.R. 2025. The net ecosystem carbon balance (NECB) at catchment scales in the Arctic. *Frontiers in Environmental Science*, 13: 1544586. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1544586

Moore C.R., Evans S.G. 2022. Shallow Soil Temperatures are Heterogeneous Across a Small Mountain Fen. *Wetlands*, 42(7): 1-13. DOI: 10.1007/s13157-022-01566-2

Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M., Potter S., Ludwig S.M., Selbmann A.K., Sullivan P.F., Abbott B.W., Arndt K.A., Birch L., Björkman M.P. 2019. Large loss of CO<sub>2</sub> in winter observed across the northern permafrost region. *Nature Climate Change*, 9(11): 852-857. DOI: 10.1038/s41558-019-0592-8

Ratcliffe J.L., Creevy A., Andersen R., Zarov E., Gaffney P.P.J., Taggart M.A., Mazei Y., Tsyganov A.N., Rowson J.G., Lapshina E.D., Payne R.J. 2017. Ecological and environmental transition across the forested-to-open bog ecotone in a west Siberian peatland. *Science of the Total Environment*, 607-608: 816-828. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.276

Raudina T.V., Loiko S.V., Istigechev G.I., Kulizhskiy S.P., Orgogozo L., Pokrovsky O.S. 2025. Contrasting soil temperature regimes in peatlands of the discontinuous permafrost zone (Western Siberia). *Geoderma*, 457: 117294. DOI: 10.1016/j.geoderma.2025.117294

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 Biogeochemical Cycles*, 18(3): GB3024. DOI: 10.1029/2003GB002190

Shul'gin A.M. 1967. *Soil Climate and Its Regulation*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 300 p. (In Russian) [Шульгин А.М. 1967. *Климат почвы и его регулирование*. Л.: Гидрометеоиздат. 300 с.]

Terentjeva I.E., Filippov I.V., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kurbatova Yu.A., Maksyutov Sh. 2020. Mapping of taiga mires in Western Siberia using remote sensing data. *Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 84(6): 920-930 (in Russian) [Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максютков Ш. 2020. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 84(6):920-930]. DOI: 10.31857/S2587556620060102

Vomperskii S.E., Ivanov A.I., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Glukhova T.V., Dubinin A.I., Glukhov A.I., Markelova L.G. 1994. Paludified soils and mires of Russia and carbon pool of their peat. *Pochvovedenie*, 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.]

Yu Z.C. 2012. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review. *Biogeosciences*, 9(10): 4071-4085. DOI:10.5194/bg-9-4071-2012

Zarov E.A., Meshcheryakova A.V., Shanyova V.S., Khoroshavin V.Yu. 2022. Water table and dissolved organic carbon seasonal dynamic at the different ecosystems of the ombrotrophic bog (Mukhrino, West Siberia). In: *Smart and Sustainable Cities Conference* (pp. 169-180). Cham: Springer Nature Switzerland. DOI: 10.1007/978-3-031-37216-2\_14.

Zarov E.A., Litvinov L.V., Shanyova V.S., Rakhova S.E., & Ivanova I. S. 2025. Middle-taiga ombrotrophic bogs as a source of DOC: Seasonal variations in concentration and spectral characteristics. *Mires and Peat*, 32(36): 1-17. DOI: 10.19189/001c.154769

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

Поступила в редакцию: 17.01.2026  
Переработанный вариант: 28.01.2026  
Принято в печать: 15.03.2026  
Опубликована: 31.03.2026