

СТРАТИГРАФИЯ И ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВЕРХОВОГО БОЛОТА МУХРИНО (СРЕДНЯЯ ТАЙГА, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Заров Е.А. *, Лапшина Е.Д.

Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

* zarov.evgen@yandex.ru

STRATIGRAPHY AND DEVELOPMENT HISTORY OF THE MUKHRINO OLIGOTROPHIC PEATLAND (MIDDLE TAIGA, WESTERN SIBERIA)

Zarov E.A. *, Lapshina E.D.

Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

* zarov.evgen@yandex.ru

Citation: Zarov E.A., Lapshina E.D. 2026. Stratigraphy and development history of the Mukhrino oligotrophic peatland (middle taiga, Western Siberia). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 17(1): 65-87.

DOI: 10.18822/edgcc699318

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена комплексному анализу геоморфологических условий формирования и основных этапов развития болотного массива Мухрино, расположенного в среднетаежной подзоне Западной Сибири. С применением современных методов (высокоточное GPS-нивелирование, цифровое моделирование рельефа, AMS ^{14}C радиоуглеродная датировка, детальный ботанический анализ торфа) реконструированы структура торфяной залежи и условия формирования болота в голоцене. Установлено, что современный единый болотный массив сформировался в результате слияния нескольких независимых центров болотообразования около 9 370 кал. лет назад. Выявлены два принципиально различных пути развития болота: заболачивание минеральных суходолов и заболачивание первичных озер. Показана пространственная неоднородность стратиграфии торфяной залежи, унаследованная от особенностей рельефа минерального ложа, гидрологического режима и автохтонных факторов развития. Определены доминирующие виды торфа (фускум-торф – 22,4%, сфагновый мочажинный – 13,9%, шейхцериново-сфагновый – 6,5%) и их пространственное распределение. Полученные данные имеют важное значение для понимания закономерностей формирования болотных экосистем региона и разработки подходов к оценке углеродного бюджета торфяников Западной Сибири за период голоцена с перспективой моделирования будущих изменений.

Ключевые слова: сфагновые болота, палеоэкология, виды торфа, голоцен, торфонакопление, Западная Сибирь, углеродный цикл.

ABSTRACT

This study presents a comprehensive paleoecological reconstruction of the Mukhrino peatland, a representative oligotrophic *Sphagnum* bog within the Middle Taiga zone of Western Siberia—the world's largest peatland region. Utilizing a multidisciplinary approach, the research aims to reconstruct the formation history of the peat deposit, its stratigraphic heterogeneity, and the main stages of ecosystem development throughout the Holocene.

Background and Objectives: As a significant global carbon reservoir, West Siberian peatlands play a crucial role in the carbon cycle. Understanding their long-term development is essential for interpreting contemporary carbon flux monitoring data and forecasting ecosystem responses to ongoing climate change. The goal of this research is to reconstruct the conditions, dynamics and ways that led to the formation of the unified Mukhrino peatland.

Methodology: The research integrates high-precision GPS leveling, digital terrain modeling (DEM), radiocarbon dating (AMS ^{14}C), and detailed plant macrofossil analysis of peat cores. A dense network of boreholes was established along four stratigraphic profiles (North, South, East, West), enabling spatially explicit analysis. Peat

classification follows genetic principles, distinguishing oligotrophic, mesotrophic, and eutrophic types based on macrofossil and trophic status.

Key results: The study reveals that the modern, unified peatland (~75 km²) formed through the coalescence of at least two primary, independent peat-accumulation centers around 9 370 calibrated years before present (cal yr BP). These centers originated via two distinct pathways: terrestrial paludification of dark-coniferous forests on mineral uplands (predominantly in the northern sector) and aquatic paludification (infilling) of primary lakes and paleo-river channels (notably in the western sector).

The internal structure of the peat deposit is highly heterogeneous, directly inherited from the pre-existing relief of the mineral basement (a flat depression with absolute elevations of 28-29 m a.s.l.) and contrasting hydrological regimes. The DEM of the mineral basement shows an inverse topography compared to the current convex bog surface, highlighting the differential peat accumulation rates. Deepest peat depositions (up to 5.5 m) are located in ancient stream and lake basins.

Early Holocene (c. 11 000-8 500 cal yr BP). Peat initiation began around 11 000 cal yr BP in a palaeochannel depression (NE sector) with eutrophic reed-hypnum peat. Shortly after (~10 600 cal yr BP), a second center developed in the south with eutrophic herbaceous (horsetail-menyanthes-fern) and hypnum peats, indicating rich groundwater-fed fen conditions. The merger of the northern and southern centers into a single hydrological system occurred around 9 370 cal yr BP.

Mid-Holocene Transition (c. 8 500-8 000 cal yr BP). The northern sector rapidly transitioned to oligotrophic conditions dominated by *Sphagnum fuscum* peat by ~8 500 cal yr BP.

Oligotrophic Phase and Late Holocene Dynamics (c. 8 000 – present). The consolidated bog entered a stable oligotrophic stage characterized by rapid peat accumulation (avg. 0.080 cm/yr). The stratigraphy is dominated by alternating layers of *Sphagnum fuscum* (hummock) peat and *Sphagnum balticum/majus/papillosum* (hollow) peat, reflecting the establishment of ridge-hollow complexes. A distinct marker horizon of woody-cottongrass peat (~4500 cal yr BP) signals a widespread, relatively dry climatic phase. A continuous layer of elevated ash content across the bog indicates a regional palaeofire event or significant aeolian deposition.

Peat types: Botanical analysis identifies oligotrophic peat as dominant (61.6% of samples). The dominant peat-forming types are: 1) *Sphagnum fuscum* (oligotrophic) peat (22.4% frequency), forming the peatland domed core; 2) *Sphagnum* hollow peat (13.9%); and 3) *Scheuchzeria-Sphagnum* peat (6.5%). Their spatial distribution is closely linked to microtopography and hydrology.

This detailed reconstruction confirms the hypothesis of a polygenetic origin for the Mukhrino peatland. The findings underscore the profound and lasting influence of initial geomorphological and hydrological conditions on peat stratigraphy, even within a seemingly uniform raised bog. This spatial heterogeneity in peat type and formation history is crucial for accurate upscaling of point-based carbon stock and accumulation rate measurements. The research demonstrates the ecosystem's resilience, having undergone significant hydrological and vegetation shifts (e.g., the mid-Holocene dry phase) while maintaining its carbon sequestration function. The study provides an essential paleo-ecological framework for interpreting data from the ongoing carbon monitoring station at the Mukhrino "Carbon Supersite", thereby improving models of carbon budget dynamics and the long-term response of West Siberian peatlands to climate change.

Keywords: *Sphagnum* peatlands, palaeoecology, peat types, Holocene, peat accumulation, Western Siberia, carbon cycle.

Используемые сокращения

РОУ – растворенный органический углерод
ЦМР — цифровая модель рельефа
кал. лет назад – калиброванных лет назад
cal yr BP – calibrated years before present
DEM – digital elevation model

ВВЕДЕНИЕ

Торфяные болота, занимая менее 3% суши, концентрируют до 30% мирового запаса почвенного углерода [Clymo et al., 1998; Xu et al., 2018; Yu et al., 2010; Yu et al., 2014]. Особое значение имеют экосистемы Западной Сибири – крупнейшего заболоченного региона планеты, содержащего ~20% мировых запасов торфа, т.е. $\sim 70.2 \times 10^9$ т углерода [Kremenetski et al., 2003; Sheng et al., 2004; Smith et al., 2004]. Сформировавшись в раннем голоцене, торфяные болота продолжают выполнять ключевую роль в глобальном углеродном цикле, накапливая углерод со скоростью 12-39 г м⁻² год⁻¹ [Bleuten, Lapshina, 2001; Turunen et al., 2001; Glebov et al., 2002; Tsyganov et al., 2021].

В условиях современного потепления климата, особенно выраженного в Западной Сибири [Anisimov, Zimov, 2020], возрастает важность изучения всех компонентов углеродного баланса. Особое внимание уделяется растворенному органическому углероду (РОУ) – продукту разложения органического вещества, который транспортируется с поверхностным стоком и может минерализоваться с выделением парниковых газов [Aravena, Wassenaar, 1993; Charman et al., 1994; Freeman et al., 2004; Frey, Smith, 2005]. Состав и свойства РОУ в значительной степени определяются строением торфяной залежи, в особенности поверхностного слоя, через который осуществляется основной сброс болотных вод в дренирующие ручьи [Ivanov, Novikov, 1976; Bleuten et al., 2020].

Изменения гидрологического режима и температуры могут существенно повлиять на углеродный баланс болот, потенциально переводя их из накопителя в источник углерода [Glebov et al., 2002; Freeman et al., 2004; Frey, Smith, 2005; Yu et al., 2010; Pearson et al., 2013; Ratcliffe et al., 2017; Zarov et al., 2025]. В этом контексте палеоэкологические реконструкции на основе торфяных отложений предоставляют уникальную возможность изучить многолетнюю динамику болотных экосистем и прогнозировать их реакцию на изменения климата в будущем [Langdon et al., 2012; Swindles et al., 2019; Tsyganov et al., 2021; Blyakharchuk et al., 2023; Zarov et al., 2023].

Комплексные исследования углеродного цикла торфяных болот важны для разработки стратегий управления болотами, как компонентами глобальной климатической системы. При этом, существующие оценки углеродного бюджета часто характеризуются высокой неопределённостью из-за неучета пространственно-временной гетерогенности болотных массивов [Anisimov et al., 2020; Zou et al., 2022]. В этом контексте, особую научную ценность представляет болотный массив Мухрино, на территории которого расположен и функционирует Карбоновый полигон, являющийся уникальной научной установкой (УНУ). Многолетние инструментальные исследования углеродного баланса болотных экосистем демонстрируют, что его динамика, наряду с влиянием микроклиматических факторов и структурой современной растительности, определяется строением и генезисом торфяной залежи [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023; Abakumov et al., 2025; Amon et al., 2025]. Поэтому, для корректной интерпретации данных мониторинга и построения репрезентативных моделей углеродного обмена необходимо восстановить историю развития самого болотного массива.

Основной целью настоящего исследования является реконструкция условий формирования и основных этапов развития болотного массива Мухрино, типичного для зоны верховых сфагновых болот Западной Сибири.

В работе ставились следующие задачи: изучение стратиграфии торфяной залежи на основе детального ботанического анализа торфа, выявление пластообразующих видов торфа и особенностей их пространственного распределения, установление основных этапов развития болотного массива.

Гипотеза исследования предполагает, что исследуемый болотный массив Мухрино, ныне занятый характерной для средней тайги болотной растительностью, сформировался из некогда разобщенных центров болотообразования, в которых вследствие различия исходных гидрохимических условий сформировались различные по стратиграфии торфяные залежи. Данное исследование позволит выявить основные закономерности развития болотных экосистем в регионе, оценить их реакцию на алло- и автохтонные факторы, отследить процесс взаимодействия между различными участками болота в процессе образования единого массива.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Район исследований

Болотный массив Мухрино площадью ~75 км² расположен на левобережной террасе реки Иртыш в среднетаежной подзоне Западной Сибири [Gvozdetkii et al., 1973]. Болото занимает

локальный водораздел между р. Мухрина и Большой речкой. Протяженность его с запада на восток на 5.5 км, с севера на юг – на 13.5 км. Абсолютные высоты территории изменяются в пределах 33-36 метров над уровнем моря. Согласно классификации болотных экосистем, данный массив относится к верховым сфагновым выпуклым олиготрофным болотам, типичным для данного региона [Ivanov, Novikov, 1976; Kats, 1977].

Климатические условия района исследований соответствуют подзоне средней тайги Западной Сибири. По данным метеорологических наблюдений, проведенных на территории болотного массива Мухрино в период 2010-2024 г., среднегодовая температура воздуха составляет -0.55°C , а количество атмосферных осадков 429.7 мм в год. Для сравнения, многолетние данные метеостанции Ханты-Мансийск за этот же период показывают следующие значения: среднегодовая температура 0.1°C и количество осадков 554,5 мм, что свидетельствует о микроклиматических особенностях болотного массива.

Гидрологическая сеть территории характеризуется наличием системы небольших ручьев, стекающих в р. Мухрина в восточной части, и в р. Большая речка, дренажная сеть которой уже полностью перекрыта торфом, в западной части болота (Рис. 1). Средняя глубина торфяной залежи составляет 3.1 метра, достигая максимальных значений 4.8-5.5 метров в местах расположения древних озерных котловин и речных палеорусел.

Методы исследований

Нивелирование поверхности болотного массива и построение цифровых моделей рельефа поверхности и минерального ложа

Нивелировочные работы проводились для создания цифровой модели рельефа поверхности болота. По всей площади была заложена регулярная сетка опробования с шагом 500 м, а для площади водосбора, первично очерченной по морфологическим признакам, с частотой 25 м. Поверхность болотного массива нивелировалась с применением дифференциального GPS-приемника Махор-GGDT Javad (горизонтальная точность – 3 мм, вертикальная – 5 мм). Работы выполнялись в кинематическом режиме: базовая станция оставалась неподвижной на протяжении всех измерений, а ровер перемещался по территории болота. В каждой точке проводилось три трехминутных сеанса измерений. В грядово-мочажинных комплексах за отсчётную поверхность принимался моховой покров в понижениях, а на кочковатых рямовых участках использовался средний уровень поверхности сфагновых кочек. Замеры выполнялись в зимний период, что позволило зафиксировать минимальные сезонные уровни болотных вод.

Построение сетки поверхности болота выполнено в программе Pinnacle (Javad Ensemble). Высотные отметки определялись путём усреднения результатов трёхминутных сессий, при этом исключались значения с отклонением более чем в 1.5 раза от других замеров в той же точке. На основе полученных данных в QGIS был создан шейп-файл высот, который затем был импортирован в SAGA GIS для интерполяции методом триангуляции. При моделировании учтены следующие поправки: высота гряд увеличена на 0.5 м (среднее значение); дно русла ручья опущено на 4 м относительно прилегающей территории (соответствует средней глубине вреза). Уровень воды в болотных озёрах и озерах принят равным уровню мочажин.

На основе данных о мощности торфяной залежи в точках бурения в QGIS был создан шейп-файл с отметками глубины. Данные были интерполированы методом обратных взвешенных дистанций (IWD) в программе SAGA GIS. В результате была получена цифровая модель распределения глубин торфа по площади всего болота.

Модель минерального ложа была получена в QGIS с применением инструмента «Калькулятор растров». Для расчета были использованы высоты цифровой модели рельефа и данные о глубинах торфа. Разница высот между двумя растровыми изображениями позволила получить цифровую модель распределения уровня поверхности минерального ложа.

Отбор торфа и AMS ^{14}C радиоуглеродная датировка

Для отбора торфяных колонок были выбраны участки болотного массива по двум поперечным и двум продольным профилям (Рис. 1). Каждая скважина при помощи торфяного бура была отобрана на всю глубину залежи, разделена на 10-сантиметровые образцы, упакована в пластиковые пакеты с застежкой и доставлена в лабораторию для дальнейших анализов.

Выборочно образцы торфа (Приложение 1, рисунки П1-П5) были проанализированы с помощью радиоуглеродного (^{14}C) метода на ускорительном масс-спектрометре (AMS) [Steinhof 2016, Steinhof et al. 2017]. Для измерения требовалось 0.7 мг углерода (C). Химическая подготовка проб включала сжигание для получения CO_2 , который улавливался и каталитически восстанавливался до графита в присутствии порошка Fe^{2+} и H_2 . Полученный графит прессовался и анализировался в системе AMS, где графит ионизировался и ускорялся в электрическом поле до энергии 400 кэВ. Изотопные отношения ^{14}C корректировали с использованием измеренных значений $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ на AMS [Steinhof et al. 2017]. Радиоуглеродные даты были калиброваны с использованием атмосферных калибровочных кривых IntCal20 [Reimer et al. 2020] и NH1 пост-бомбового периода [Hua et al. 2013] с использованием пакета «clam» в программном языке R [Blaauw 2020]. Результаты радиоуглеродных датировок опубликованы ранее [Lamentowicz et al., 2015; Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

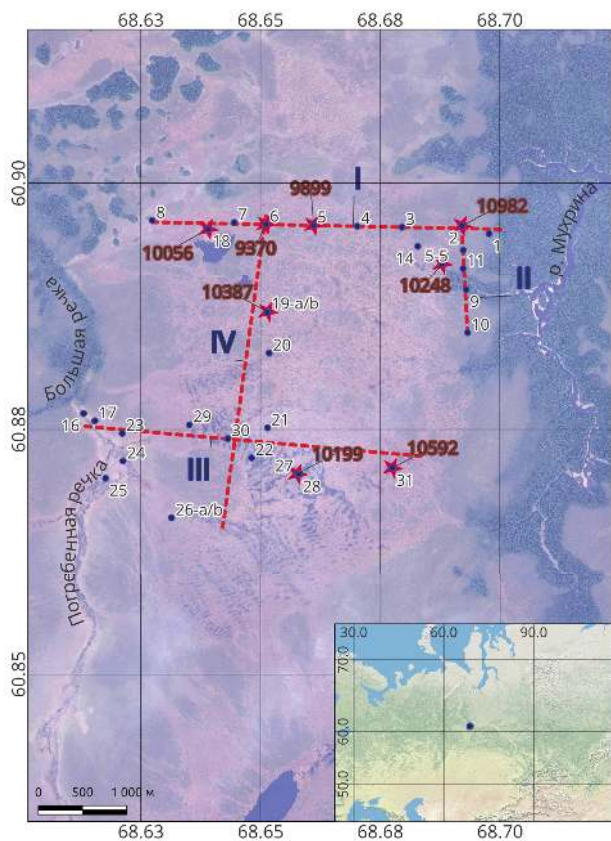


Рис. 1. Расположение торфяных скважин (голубые точки), стратиграфических профилей (прерывистые красные линии) и точек отбора придонных образцов торфа на абсолютный возраст (красные звёзды). Римскими числами обозначены номера профилей: I – северный, II – восточный, III – южный, IV – западный; черные числа с красной обводкой – абсолютный возраст, кал. лет назад; черные числа с белой обводкой – номер торфяной скважины. Врезка: синяя точка – расположение болотного массива Мухрино на физической карте.

Fig. 1. Location of peat boreholes (blue dots), stratigraphic sections (dashed red lines), and sampling points for basal peat samples for absolute dating (red stars). Roman numerals denote profile numbers: I – northern, II – eastern, III – southern, IV – western; black numbers with red outline – absolute age, calibrated years BP; black numbers with white outline – peat borehole number. Inset: blue dot – location of the Mukhrino peatland on the physical map.

Ботанический анализ торфа

Ботанический анализ торфяных образцов выполнялся в научно-образовательном центре «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата» Югорского государственного университета. Методика включала промывку проб торфа через сито с размером ячеек 0.25 мм и последующим микроскопическим анализом (микроскоп МикМед Ломо5 при увеличениях 40x и 120x). Определение растительных остатков проводилось с использованием стандартных атласов и

определителей [Kats, 1977]. Количественная оценка выполнялась глазомерно с приведением результатов в процентном отношении к общей площади предметного стекла.

Обработка и визуализация стратиграфических данных выполнялась с использованием специализированного программного обеспечения PeatGraph [Dyukarev, 2003]. Это позволило построить серию детальных стратиграфических колонок, отражающих вертикальную структуру торфяной залежи (Приложение 1, рисунки П1-П5).

Определение вида торфа

Под генетическим видом торфа в работе понимается первичная таксономическая единица классификации торфов, которая характеризуется определённым ботаническим составом, степенью разложения, содержанием гумуса и другими свойствами. Каждый генетический вид торфа соответствует определённому фитоценозу (растительному сообществу), который его сформировал [Туземнов, 1976]. Пластообразующим считается вид торфа, который слагает значительные по мощности и пространственной протяжённости слои (пласты) в торфяной залежи. Пластообразующие виды торфа отражают устойчивые фитоценозы и болотные комплексы, существовавшие на болоте в течение длительного времени [Туземнов, 1976].

Выделение видов торфа основывается на преобладании остатков той или иной группы видов определенной экологии, например, сфагновых мхов, осок или древесины, в соответствии с принятой классификацией [Туземнов, 1976; Matukhin, 2000; Liss et al., 2001]. К древесной группе относили торфа с количеством древесных остатков (кора, древесина) 40% и более, к древесно-травяной и древесно-моховой группам – с количеством древесных остатков в пределах 15-35%. При этом остатки травянистых растений и мхов составляли не менее 35% во второй и третьей группе соответственно. Торфа с количеством древесных остатков менее 15% относили к травяной, моховой или травяно-моховой группам. Если остатки мхов составляли 40% и более, торф относили к моховой группе, при содержании от 10 до 35% – к травяно-моховой, если не более 5% – к травяной группе. Встречаемость видов торфа была определена как отношение количества образцов данного вида торфа к общему количеству отобранных образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Современные болотные ландшафты, растительность и рельеф

Ландшафтная структура болотного массива Мухрино является типичной для крупных верховых сфагновых болот таежной зоны Западной Сибири [Terentieva, et al., 2016]. На периферии развиты рослые рямы – сосново-кустарничково-сфагновые фитоценозы с высотой древесного яруса 6-8 м, густым кустарничковым ярусом и доминированием *Sphagnum angustifolium* в моховом покрове. Склоны западной и восточной частей заняты типичными рьями – сосново-кустарничково-сфагновыми сообществами с низкорослым древесным ярусом высотой 1.5-4 м и доминированием *Sphagnum fuscum* в моховом покрове, тогда как центральная часть характеризуется развитием грядово-мочажинных комплексов, где рямовые фрагменты на грядах сочетаются с обводненными пушицево-сфагновыми (*Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum balticum*) и осоково-шейхцериево-сфагновыми (*Carex limosa*, *Scheuchzeria palustris*, *Sphagnum majus*, *S. balticum*, *S. papillosum*) топями и мочажинами. Относительно пониженные наиболее обводненные участки на месте бывших первичных водотоков заняты обширными топями или грядово-озерковыми комплексами.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) иллюстрирует изменение абсолютных высот территории в пределах 33-36 метров над уровнем моря, при этом общий перепад высот на болотном массиве достигает 1.8 метра (Рис. 2). ЦМР выявила четкое морфологическое разделение поверхности болота на два участка: более высокий северный и относительно пониженный южный, что

свидетельствует о их первоначально независимом развитии и последующем слиянии. Северный участок в абсолютных значениях примерно на 80 см выше южного. Максимальный перепад высот на северном участке составляет 1.4 м (Рис. 2, профиль I), тогда как на южном участке этот показатель достигает 1.8 м.

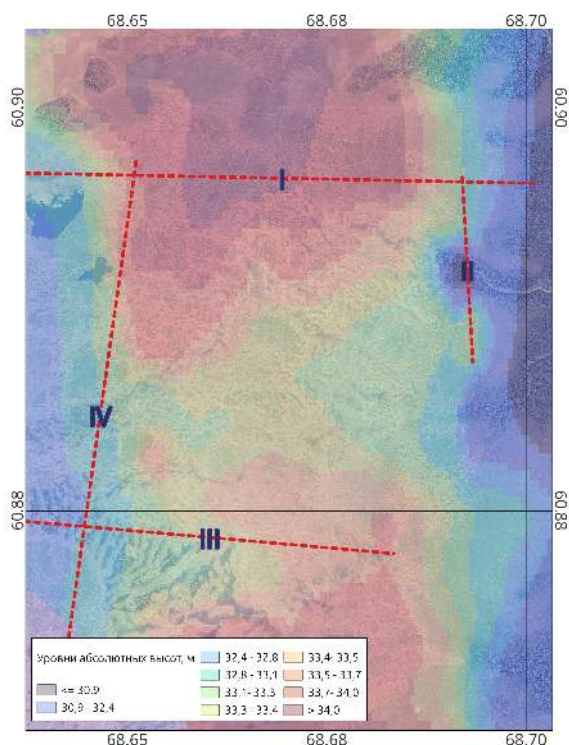


Рис. 2. Цифровая модель рельефа поверхности болотного массива Мухрино. Римскими числами обозначены номера профилей.

Fig. 2. Digital elevation model of the Mukhrino peatland. Profile numbers are indicated with Roman numerals.

ЦМР позволила соотнести основные болотные фации, характерные для верхового болота, с положением в рельефе. Пологие участки с замедленным стоком заняты грядово-мочажинными комплексами, когда на более дренированных участках развиваются рямы. Наиболее обводненные участки, по которым осуществляется поверхностный сток болотных вод, приурочены к обширному перепаду высот (до 1.5 м) на юго-западе болотного массива, где формируется грядово-озерковый комплекс «Полосатая топь».

Цифровая модель минерального ложа и распределение глубин торфяной залежи

Построенная модель отображает распространение глубин торфа по площади болота. Наибольшие глубины сосредоточены в центральной части современного болотного массива со смещением на восток (Рис. 3а). Мощность торфяной залежи уменьшается при продвижении от центра к периферии, где на границе со смешанным лесом торфяные отложения полностью исчезают.

Рельеф минерального ложа имеет обратную направленность по сравнению с современным рельефом поверхности болота, что обусловлено более высокой скоростью накопления сфагнового торфа в центре болотного массива, где расположена обширная плоская котловина с абсолютными отметками 28-29 м над уровнем моря. Северная и южная границы болотной котловины возвышаются над центральной частью на 1-1.5 метра. В западной и восточной частях расположены понижения минерального ложа, через которые осуществлялся сток воды в ближайшие водотоки – Большую речку и р. Мухрина, а также происходит питание озера в северо-западной части болота.

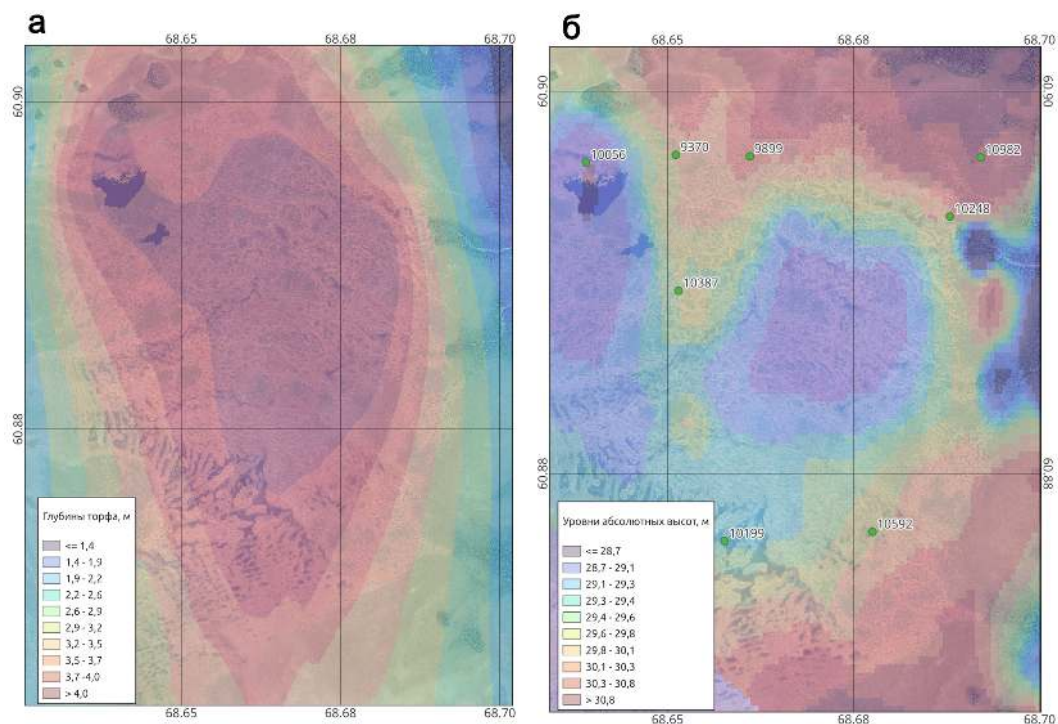


Рис. 3. Цифровая модель мощности торфяных отложений (а) и рельефа поверхности минерального ложа (б) болотного массива Мухрино.

Fig. 3. Digital model of peat deposit thickness (a) and the mineral basement surface (б) of the Mukhrino peatland.

Стратиграфия торфяной залежи и основные этапы развития болота

Наиболее древняя датировка придонного слоя торфа – $10\,982 \pm 21.3$ кал. лет, зарегистрирована на глубине 520 см в точке 2 в северо-восточной части современного болотного массива (Рис. 1, 3б). Несколько позже второй первичный очаг торфообразования появился в южной части болота (около точки 31), где возраст торфяной залежи на глубине 380 см составляет $10\,592 \pm 23.2$ года (Рис. 1, 3б).

Первичная депрессия в северо-восточной части (глубиной 150 см) локализована на ограниченной площади и скорее всего является днищем притеррасной старицы (Рис. 4, скважина 2). Процесс торфообразования начался здесь $\sim 11\,000$ кал. лет назад с отложения метрового слоя тростникового торфа, который был перекрыт тонким слоем тростниково-сфагнового торфа с преобладанием остатков *Sphagnum riparium*, *S. teres* и примесью гипновых мхов. С глубины 410 см ($\sim 9\,800$ кал. лет назад) гипновый торф с прослойкой (20-30 см) пушицево-сфагнового (*Sphagnum warnstroffii*) торфа полностью заполняет первичную ложбину и выходит на прилегающую поверхность.

К этому времени (9 400 кал. лет назад) основные площади в северной части локального водораздела между р. Мухрино и Большой речкой уже были заняты мелкозалежным болотом лесного облика, возникшем в результате суходольного заболачивания темнохвойных лесов (Рис. 1, 4, скважины 3-7). Болотнотравно-кочкарноосоковые сообщества с хорошо развитым древостоем из сосны, ели, кедра и березы отложили придонный пласт низинного древесно-травяного торфа мощностью 10-30 см торфа, образованного остатками древесины и кочкарных осок (*Carex cespitosa*, *C. juncella*) с примесью папоротника и вахты.

После непродолжительной переходной стадии оставившей прослойку сфагново-травяного торфа из остатков осок, пушицы и сфагновых мхов мощностью не более 20 см болото во всей

своей северной части почти единовременно ~8 500 кал. лет назад перешло в верховую стадию развития с преобладанием в торфе остатков *Sphagnum fuscum*.

По мере роста торфяной залежи и формирования выпуклой формы поверхности ~8 000 кал. лет назад в центральной части и на склонах стали формироваться грядово-мочажинные комплексы, о чем свидетельствует закономерное чередование слоев верхового фускум торфа и мочажинных торфов из остатков шейхцерии, пушицы (*Eriophorum* spp.), осоки (*Carex limosa*) и топяных видов сфагновых мхов (*Sphagnum balticum*, *S. majus*, *S. papillosum*).

Около 4 500 кал. лет назад на глубине 160 см в торфяной залежи болота в растительных остатках повсеместно начинает доминировать пушица (*Eriophorum vaginatum*) с примесью сосны, что может свидетельствовать о наступившем более сухом климатическом периоде. Эти древесно-пушицевые сообщества отложили 20-40 см торфа, после чего болотный массив приобрел современный облик с грядово-мочажинными комплексами в центральной части и рябовыми участками по окрайкам.

В западной части северного участка заболачивание началось на месте первичного озера (скважина 18, Рис. 1, 4). Торфяная залежь здесь подстилается метровым слоем озерных отложений (сапропелем) – с остатками водной флоры и фауны, сформировавшимися в период с ~10 000 до 6 500 кал. лет назад. После заполнения краевой части озерной котловины сапропелем в условиях ещё относительно богатого минерального питания поверхность озера затянулась болотной сплавной, образованной гипновыми мхами, которые сформировали слой низинного торфа мощностью 10-15 см. Дальнейшее обеднение условий водно-минерального питания за счет притока бедных кислых вод с южного и восточного центров торфонакопления привели к быстрому переходу этого участка в верховую стадию. В период с 6 500 до 5 300 кал. лет назад это привело к формированию 40-сантиметрового слоя сфагнового мочажинного и шейхцериово-сфагнового видов торфа с преобладанием остатков шейхцерии, *Sphagnum papillosum* и *S. balticum*. Выше мочажинный торф сменяется 110-сантиметровым пластом фускум-торфа, что свидетельствует о продолжительном периоде (5 300-3 100 кал. лет назад) с относительно более сухими условиями, способствовавшими расширению площади сосново-кустарничково-сфагновых гряд и формированию рямов с доминированием *Sphagnum fuscum*.

В современной ландшафтной структуре по берегам сохраняющегося водоема (скважина 18, Рис. 1, 4) гидрофильные сфагновые мхи (*Sphagnum papillosum*, *S. lindbergii*) формируют ковры. За последние 3 000 лет под влиянием изменения уровня воды в озере, как фактора переувлажнения окружающей территории, их площадь периодически то расширялась, то сокращалась. В северо-западной части болота это влияние в наиболее многоводные периоды распространялось на расстояние до полутора километров, о чем свидетельствует отложение топяных сфагновых торфов в верхних горизонтах скважины 6 на глубине 60-100 см (Рис. 4).

Торфяная залежь по периферии болота в северной части (Рис. 1, 4, скважина 1) является маломощной и не превышает 2 м по глубине. Придонный слой сформирован древесно-пушицевым торфом. Верхняя часть залежи сложена пушицево-сфагновым торфом из остатков сфагновых мхов (*Sphagnum angustifolium*) и пушицы (*Eriophorum vaginatum*) с примесью *Carex rostrata*, вересковых кустарничков и древесных остатков. Обращает на себя внимание периодическое присутствие в торфе и современном растительном покрове по периферии болота осоки *Carex globularis*, что свидетельствует о периодическом воздействии пожаров на краевые части болотного массива.

На всём протяжении северного профиля на глубине 0.5 - 1.2 м зафиксирован сплошной прослой с повышенной зольностью (Рис. 4). Его формирование может быть связано с региональным палеопожаром, продолжительным аридным периодом или эпизодом масштабного эолового осадконакопления. Для установления генезиса данного горизонта необходимы дополнительные целенаправленные исследования.

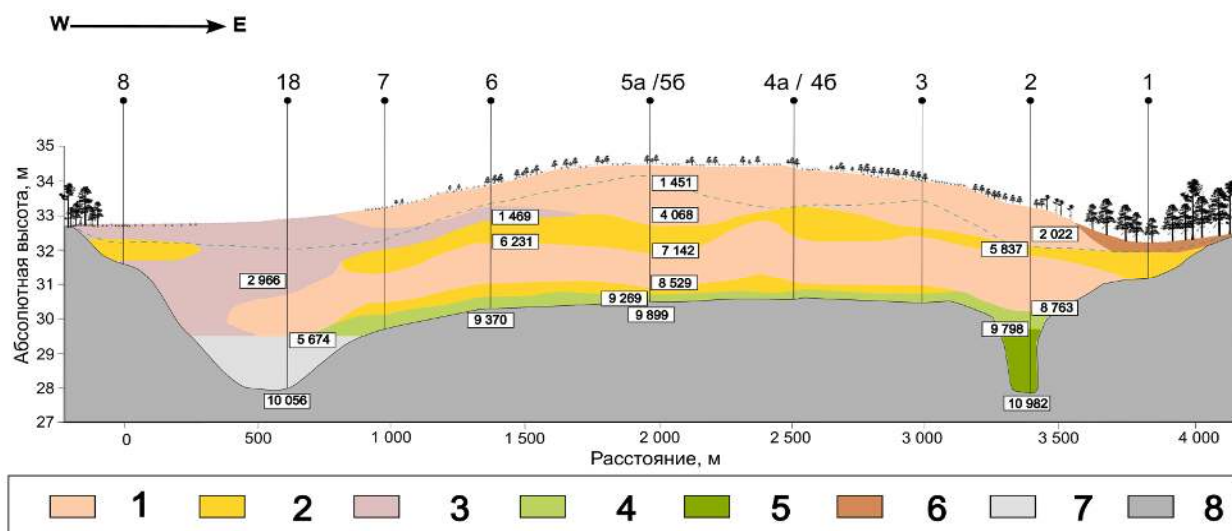


Рис. 4. Северный стратиграфический профиль. Обозначения торфа (1-7): 1 – сфагновый верховой и фускум-торф, 2 – пушицевый верховой, 3 – мочажинный сфагновый и шейхцериево-сфагновый верховой, 4 – низинный древесный, 5 – низинный тростниково-гипновый, 6 – переходный древесно-травяно-сфагновый со следами пожаров, 7 – сапропель, 8 – глина. Синяя пунктирная линия обозначает слой повышенной зольности, обнаруживающийся по всей площади болота. Число в рамке — возраст, кал. лет назад.

Fig. 4. Northern stratigraphic section. Peat types (1-7): 1 – *Sphagnum* oligotrophic and *Fuscum* peat, 2 – cotton-grass oligotrophic peat, 3 – hollow *Sphagnum* and *Scheuchzeria-Sphagnum* oligotrophic peat, 4 – minerotrophic woody peat, 5 – minerotrophic reed-hypnum peat, 6 – minerotrophic woody-cotton-grass peat with traces of fires, 7 – gittiya, 8 – clay. The blue dashed line indicates a layer of increased ash content, detected across the entire bog area. The number in the frame is the age, cal. years BP.

Южный стратиграфический профиль западного склона болотного массива Мухрино отражает основные стадии развития этой части болотного массива (Рис. 1, 5, скважины 29, 30, 21, 22, 27, 28, 31). Генетическим центром торфонакопления здесь явилась ложбина, где постоянное переувлажнение поверхности обеспечивал поверхностный сток относительно богатых минеральными элементами вод. В современном ландшафтном покрове положение этого участка приурочено к так называемой «Полосатой топи» – грядово-озерковому комплексу, разгружающемуся в Погребённую речку. По этой площади исходно осуществлялся сток вод, что в большей мере и определило стратиграфическое строение всей торфяной залежи.

На участке между скважинами 21-31 придонный слой торфа мощностью до 60 см сложен остатками хвоща, папоротника и вахты, что свидетельствует о богатстве минерального питания и высоком уровне увлажненности территории на первых этапах ее заболачивания грунтовыми водами. С глубины 350 см практически на всём протяжении профиля прослеживается слой слабо разложенного гипнового торфа с примесью вахты и осок (в основном *Carex lasiocarpa* и *C. limosa*). Мощность слоя возрастает по направлению с востока на запад от 0.5 до 1.0 м. В интервале скважин 29-30 он залегает в придонной части, замещая хвощовый торф.

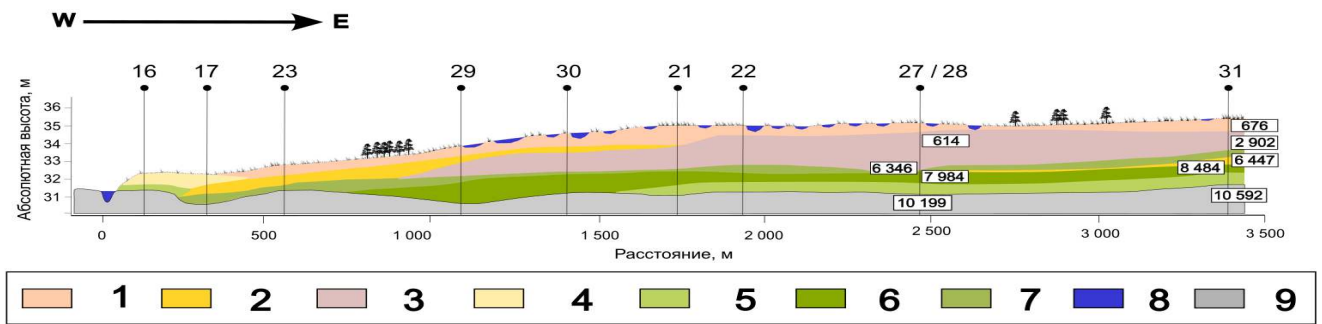


Рис. 5. Южный стратиграфический профиль. Обозначения торфа (1-7): 1 – сфагновый верховой, 2 – пушицевый верховой, 3 – шейхцериевый верховой, 4 – сфагновый переходный, 5 – низинный болотнотравный (хвощево-вахтово-папоротниковый), 6 – низинный гипновый, 7 – низинный древесный, 8 – вода, 9 – глина. Число в рамке — возраст, кал. лет назад.

Fig. 5. Southern stratigraphic section. Peat types (1-7): 1 – *Sphagnum* oligotrophic peat, 2 – cotton-grass oligotrophic peat, 3 – *Scheuchzeria* oligotrophic peat, 4 – *Sphagnum* meso-oligotrophic peat, 5 – minerotrophic fen herb peat (horsetail-menyanthes-fern), 6 – minerotrophic hypnum peat, 7 – minerotrophic woody peat, 8 – water, 9 – clay. The number in the frame is the age, cal. years BP.

Около 6 500 кал. лет назад широкое распространение в южной части современного болотного массива Мухрино получили древесные сообщества из сосны и березы, отложившие слой древесно-травяного торфа из остатков сосны, березы, вахты, осок и шейхцереи. Мощность этого слоя не превышает 60 см, при этом его распространение охватывает весь профиль между скважинами 17 и 31 (Рис. 5).

Вся средняя часть торфяной залежи сложена переходным шейхцериевым и верховым шейхцериево-сфагновым видами торфа мощностью до ~2 м. Верхний горизонт торфяной залежи образован остатками олиготрофных сфагновых мхов (*Sphagnum balticum*, *S. papillosum*) и в меньшей степени трав, отражая современный растительный покров в этой части болота.

Наименьшие глубины (100-150 см) в южной части болота отмечены в непосредственной близости к Погребенной речке (Рис. 1, 5, скважины 16, 17 и 23). В условиях периодического подтопления и слабого аллювиального загрязнения придонный слой торфа в районе скважины 16 сложен хвощевым и хвощево-осоковым видами торфа, с преобладанием *Carex cespitosa* и *C. rostrata*. Поверхностный слой мощностью 50-100 см образован остатками *Sphagnum fallax*, *S. angustifolium* с примесью кустарничков и распространяется до участка скважины 17.

Западный профиль пересекает оба участка – северный и южный, проходя через скважины 6, 19а/б, 20, 21, 22, 26а/б (Рис. 1, 6). Заболачивание северного участка болотного массива произошло 9 370±92 кал. лет назад одновременно с его объединением с южным участком. В этот период южный участок был занят гипновыми и болотнотравно-гипновыми топяными сообществами, тогда как северный участок характеризовался обилием древесной растительности с папоротником и кочкарными осоками, которые по мере переувлажнения близлежащих территорий и поднятия уровня грунтовых вод замещались пушицево-сфагновыми сообществами с участием *Sphagnum squarrosum*. Около 7 500 кал. лет назад сообщества перешли к атмосферному типу питания с чередованием торфов, характерных для грядово-мочажинного комплекса с доминированием *Sphagnum fusum* и *S. balticum*.

Судя по рельефу минерального ложа и данных по уровням высот поверхности болота, отрезок между скважинами 6 и 19а/б является южным склоном северного купола болотного массива. Сток воды в прошлом и до настоящего времени происходил в южном направлении. Это способствовало развитию в придонном слое центральной части профиля папоротникового торфа мощностью до 60 см, который в южной части профиля заменяется хвощовым торфом. Слой гипнового торфа в северной части профиля (в районе скважины 19а/б) формирует маломощную прослойку, тогда как в южной части его толщина достигает 1 м. При этом, слой шейхцериевого и шейхцериево-сфагнового торфа покрывает весь участок профиля.

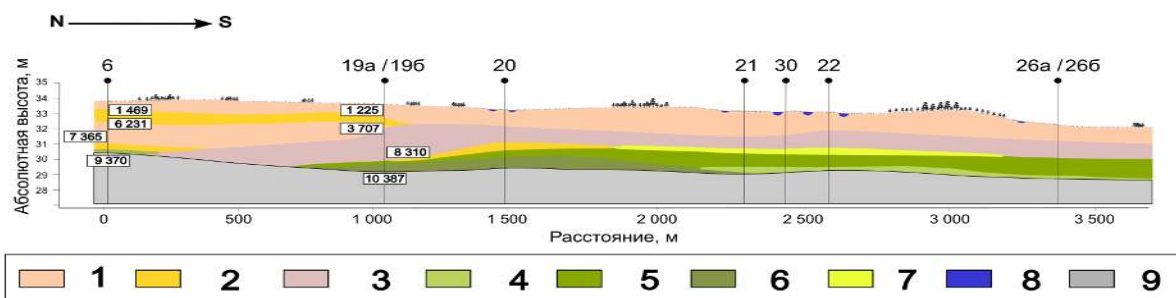


Рис. 6. Западный стратиграфический профиль. Обозначения торфа (1-7): 1 – сфагновый верховой, 2 – пушицевый верховой, 3 – шейхцериевый и шейхцериево-сфагновый верховой, 4 – низинный хвощовый, 5 – низинный гипновый и болотнотравно-гипновый, 6 – низинный папоротниковый, 7 – низинный древесный; 8 – вода, 9 – глина. Число в рамке – возраст, кал. лет назад.

Fig. 6. Western stratigraphic section. Peat types (1-7): 1 – *Sphagnum* oligotrophic peat, 2 – cotton-grass oligotrophic peat, 3 – *Scheuchzeria* and *Scheuchzeria-Sphagnum* oligotrophic peats, 4 – minerotrophic horsetail peat, 5 – minerotrophic hypnum and herb-hypnum peat, 6 – minerotrophic fern peat, 7 – minerotrophic woody peat; 8 – water, 9 – clay. The number in the frame is the age, cal. years BP.

Восточный профиль пересекает истоки небольшого водосборного ручья, осуществляющего сброс поверхностных болотных вод в р. Мухрина (Рис. 1, 7, скважины 2, 12, 11, 9, 10). Придонные слои вдоль восточной периферии болотного массива Мухрино сложены малопродуктивными отложениями древесного торфа, перекрытыми 10-20 сантиметровым слоем пушицевого торфа. Верхнюю часть залежи формирует пласт фускум-торфа мощностью до 300 см с прослойками пушицевого и древесно-пушицевого торфа на глубине 80-100 см.

В наиболее глубоких понижениях минерального ложа южнее ручья на глубине 280-330 см обнаружен слой папоротникового торфа (Рис. 7, скважина 10), что свидетельствует о сравнительно богатом грунтовом питании на начальных стадиях развития в этой части болота.

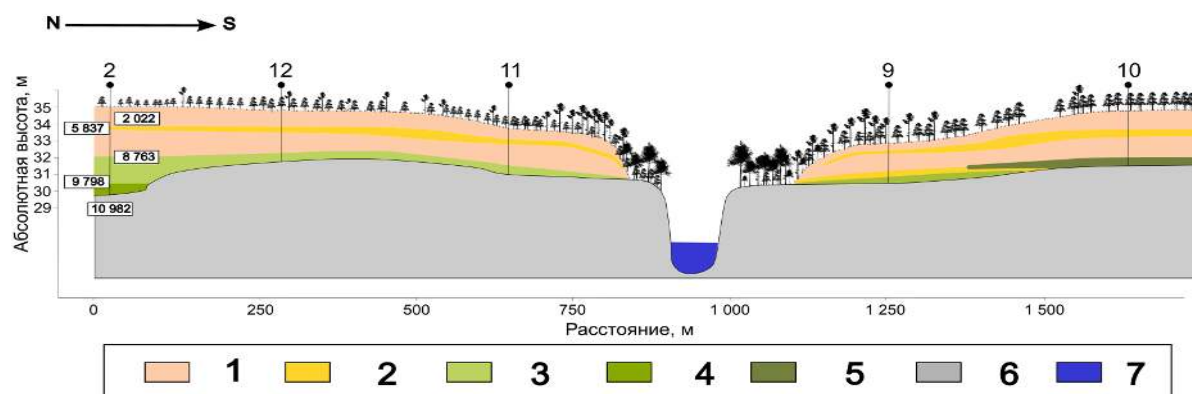


Рис. 7. Восточный стратиграфический профиль. Обозначения торфа (1-5): 1 – сфагновый верховой, 2 – пушицевый верховой, 3 – низинный древесный, 4 – низинный тростниково-гипновый, 5 – низинный папоротниковый, 6 – глина, 7 – вода. Число в рамке — возраст, кал. лет назад.

Fig. 7. Eastern stratigraphic section. Peat types (1-5): 1 – *Sphagnum* oligotrophic peat, 2 – cotton-grass oligotrophic peat, 3 – minerotrophic woody peat, 4 – minerotrophic reed-hypnum peat, 5 – minerotrophic fern peat, 6 – clay, 7 – water. The number in the frame is the age, cal. years BP.

Встречаемость видов торфа и особенности их пространственного распределения

В торфяной залежи выявлено 3 типа торфа – верховой, переходный и низинный в соответствии с основными стадиями развития болота (Приложение 2, Табл. П2). На долю верхового торфа приходится подавляющее количество исследованных образцов – 61.6% и 19 генетических видов торфа. Переходный тип представлен 12 видами торфа. На долю низинных видов торфа приходится 23.6% и 18 генетических видов торфа. Такое распределение является следствием ранней олиготрофизации болотного массива в процессе его развития.

Наибольшее распространение имеют виды торфа моховой (43%), травяно-моховой (24.6%) и травяной (22.5%) групп. На остальные группы видов торфа приходится всего около 10%. Наибольшую встречаемость имеют фускум-торф (22.4%), сфагновый мочажинный (13.9%) и шейхцерицево-сфагновый (6.5%) виды торфа (Приложение 2, Табл. П2).

Таким образом, основу торфяной залежи болотного массива составляют верховые фускум-торф и сфагновый мочажинный виды торфа.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование болотного массива Мухрино дает понимание общих закономерностей развития торфяных болот в среднетаежной подзоне Западной Сибири в голоцене. Полученные данные позволяют установить причинно-следственные связи между исходным рельефом поверхности, условиями водно-минерального питания и формированием разных типов торфяной залежи.

Формирование болотного массива началось в позднем плейстоцене – раннем голоцене, когда создались благоприятные палеогеографические условия для развития болотообразовательного процесса: оптимальные температуры и влажность климата, плоский рельеф, широкое распространение слабо проницаемых осадочных пород, переувлажненность почв. Радиоуглеродные датировки придонных слоев торфа (10 900-10 000 кал. лет назад) соответствуют периоду климатического потепления после позднеледникового похолодания [Khotinskii, 1982].

Процесс торфонакопления начался около 11 000 кал. лет назад на локальном участке в северо-восточной части современного болотного массива в глубокой депрессии палеорусл, где в течение 400 лет откладывался тростниковый и тростниково-гипновый торф. Еще до заполнения этой первичной депрессии торфом, около 10 590 кал. лет. назад, новый изолированный очаг торфонакопления появляется в южной части современного болотного массива, который быстро расширяет свою площадь и в течение 500 лет охватывает всю пониженную центральную часть локального водораздела, где широкое распространение получают низинные болотнотравные (хвощево-вахтово-папоротниковые) и осоково-гипновые топи богатого грунтового питания. Под их влиянием происходит подтопление и аллохтонное суходольное заболачивание долинных темнохвойных и смешанных лесов в северной части локального водораздела. Уже около 8 500 кал. лет назад после непродолжительной низинной и переходной стадий, оставивших маломощные слои древесно-травяного и травяного торфа северная часть болота почти на всей площади перешла в верховую стадию развития с преобладанием в растительном покрове сообществ с доминированием *Sphagnum fuscum*.

Первичные очаги торфонакопления слились в единую болотную систему 9 370 кал. лет назад. На южном участке массива, в условиях повышенной обводнённости, ещё на протяжении почти двух тысяч лет сохранялись шейхцерицевые и шейхцерицево-сфагновые топи. Центральная часть болота осталась неохваченной бурением, однако, на основе анализа геоморфологии болотной котловины (Рис. 3б) можно предположить, что именно к этому сектору могут быть приурочены наиболее древние отложения. Таким образом, слияние северного и южного очагов заболачивания, вероятно, происходило по её центральной оси. Для проверки данного

предположения и уточнения палеогеографической реконструкции необходимы дополнительные полевые исследования.

С переходом болотного массива в верховую сфагновую стадию развития началось быстрое нарастание мощности торфяной залежи, при этом скорость торфонакопления составила 0.080 ± 0.02 см/год по сравнению с 0.062 ± 0.033 см/год и 0.061 ± 0.027 см/год в периоды низинной и переходной стадий развития болота [Zarov et al., 2023]. За период олиготрофной стадии развития до настоящего времени образовался мощный (до 3 м) слой фускум-торфа, формирующий куполообразный профиль северной части массива и свидетельствующий о стабилизации водно-минерального питания.

Детальный стратиграфический анализ позволил реконструировать не только основные этапы развития самого болотного массива, но и изменение палеоклиматических условий в регионе на протяжении всего голоцена [Amon et al., 2020; Amon et al., 2025], делая Мухрино ценным объектом для изучения истории природных ландшафтов Западной Сибири.

Примечательной особенностью торфяных отложений болотного массива Мухрино является наличие прослойки древесно-пушицевого торфа на глубине 100-150 см сформировавшейся ~4 500 кал. лет назад и отражающей единообразное изменение растительности по всей площади болота, вызванное вероятнее всего изменением гидроклиматических условий.

Обнаружение прослоек древесно-пушицевого торфа свидетельствует о коренной перестройке состава и внешнего облика болотных экосистем в ответ на внешние факторы с последующим быстрым восстановлением типичных сфагновых (рямовых) сообществ. Это указывает на высокую устойчивость верховых сфагновых болот и предполагает, что ожидаемые климатические изменения могут не оказать катастрофического воздействия и не привести к высвобождению накопленного углерода, а лишь вызвать перестройку ландшафтной структуры болотных массивов за счет изменения площадного соотношения болотных биогеоценозов.

Выявленная пространственная неоднородность стратиграфии, унаследованная от рельефа минерального ложа и особенностей гидрологии, указывает на то, что даже в пределах одной болотной системы верхового типа существуют отдельные участки и обширные территории с принципиально разной историей развития и строением торфяной залежи. Этот вывод важен для построения пространственных моделей динамики накопления углерода, так как физико-химические свойства (плотность, степень разложения, зольность) и, следовательно, содержание углерода низинных, переходных и верховых торфов различны [Chambers et al., 2011, Beilman et al., 2009].

Общепринятые подходы экстраполяции данных точечных исследований на всю площадь болота [Sheng et al., 2004, Smith et al., 2004] могут приводить к значительным погрешностям в оценках пула углерода. В отличие от них, комплексные реконструкции истории развития болотного массива, подобные проведенной на Мухрино на основе детального ботанического анализа торфа, построения стратиграфических профилей, в сочетании с цифровым моделированием рельефа поверхности и минерального ложа, повышают точность региональных оценок скорости накопления и запасов углерода в торфяных залежах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило установить основные закономерности возникновения и развития болотного массива Мухрино, где проводится многолетний непрерывный мониторинг состояния показателей окружающей среды и цикла углерода. Детальное изучение стратиграфии важно для сопоставления актуального баланса углерода с динамикой накопления его в голоцене, с целью дальнейшего прогнозирования отклика болотных экосистем на изменения климата. Полученные результаты свидетельствуют о сложности процесса

формирования торфяных болот, определяемого как климатическими факторами, так и локальными геоморфологическими и гидрогеологическими условиями.

Выделенные этапы развития болота отражают общую тенденцию к олиготрофизации и смене растительных сообществ по мере накопления торфяных залежей. Доминирующими видами торфа являются верховые сфагновые и травяно-сфагновые, которые преимущественно отлагаются в центральной части болотного массива.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данные исследования проведены с использованием инфраструктуры Карбонового полигона «Мухрино» в рамках государственного задания "Карбоновые полигоны" (рег. №122122800014-7).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 APPENDIX 1

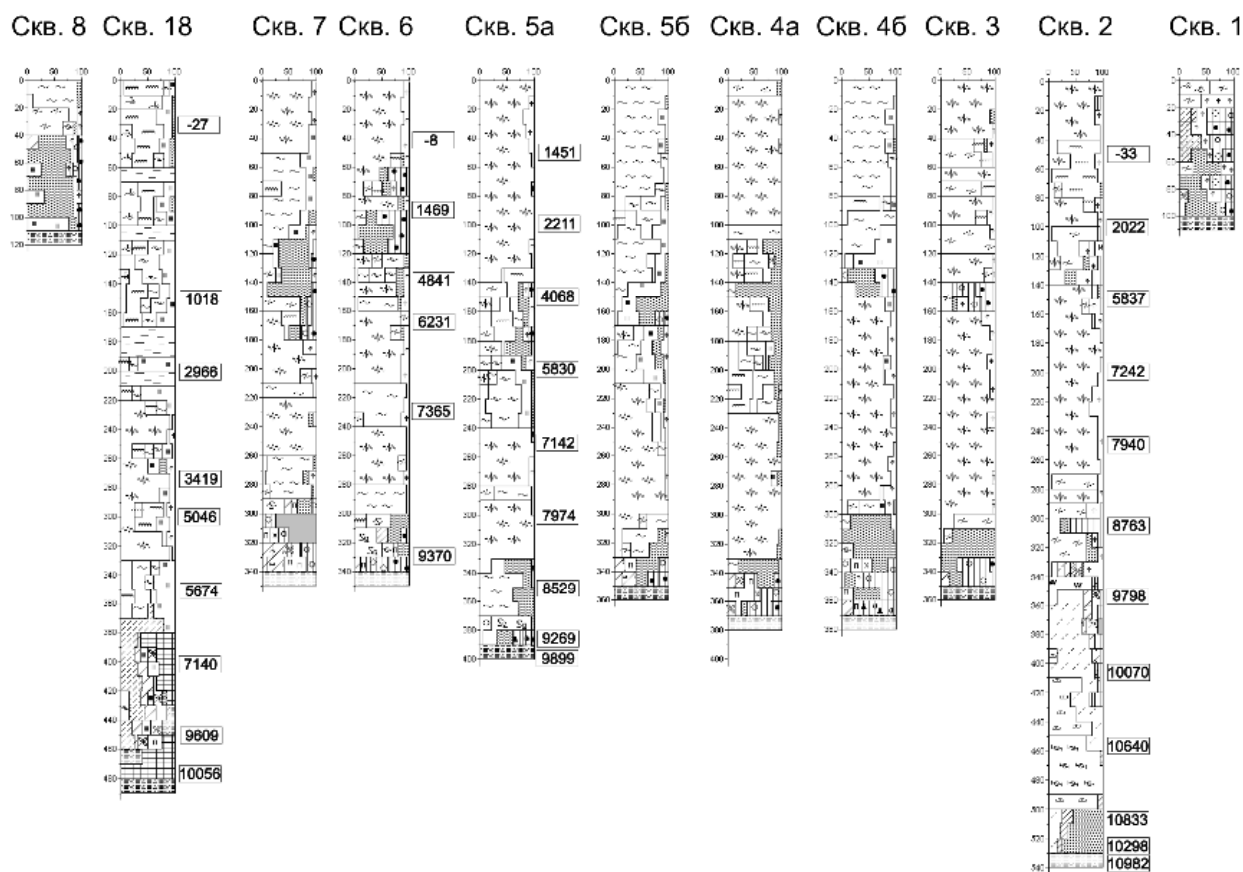


Рис. П1. Ботанический состав торфяных скважин вдоль северного профиля. Число в рамке — возраст, кал. лет назад. Даты указаны по данным статей [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

Fig. П1. Macrofossil of peat cores along the northern transect. Number in frame — age, cal years BP. Dates are given according to the data from articles [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

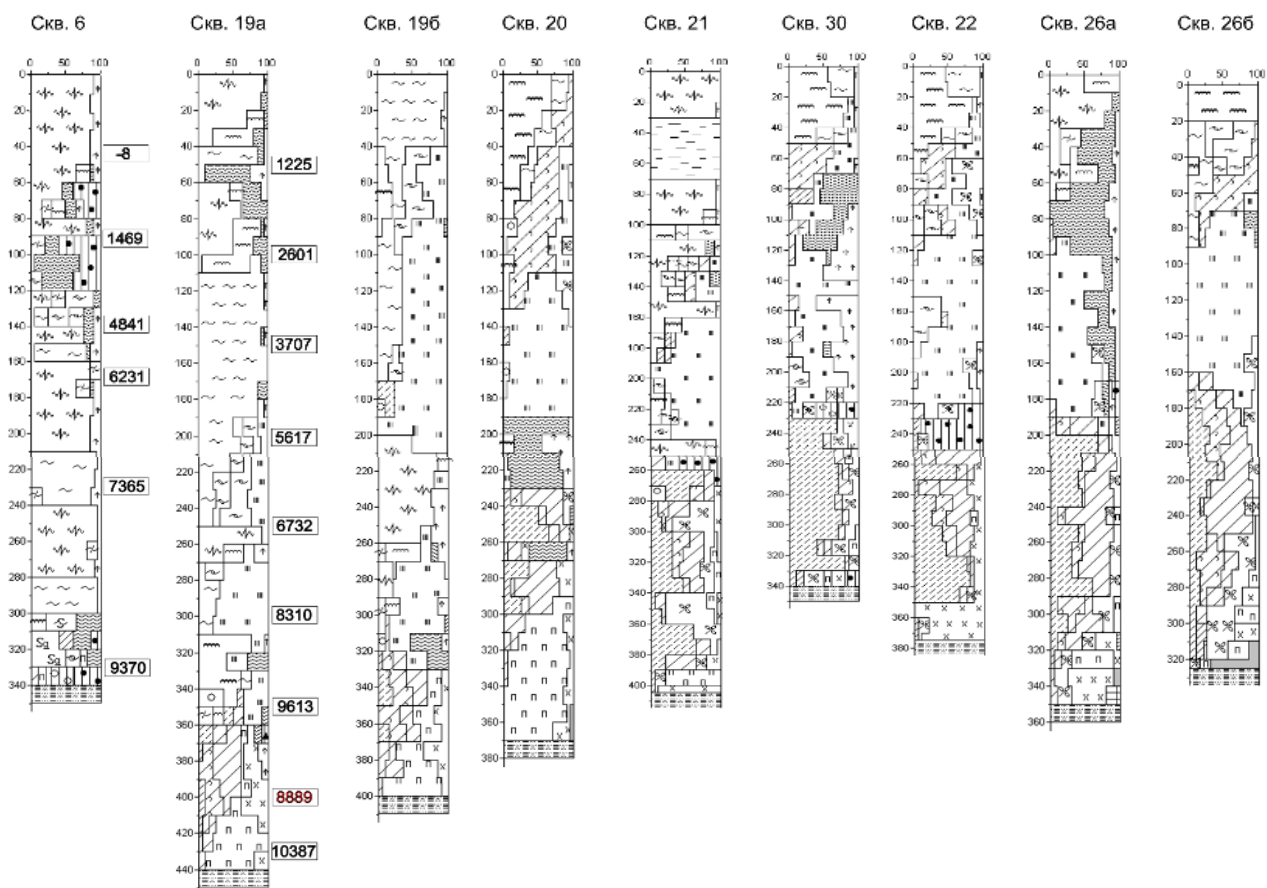


Рис. П2. Ботанический состав торфяных скважин вдоль западного профиля. Число в рамке — возраст, кал. лет назад. Красным цветом выделены возрастные инверсии. Даты указаны по данным статей [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

Fig. P2. Macrofossil of peat cores along the western transect. Number in frame — age, cal years BP. Red color highlights age inversion. Dates are given according to the data from articles [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

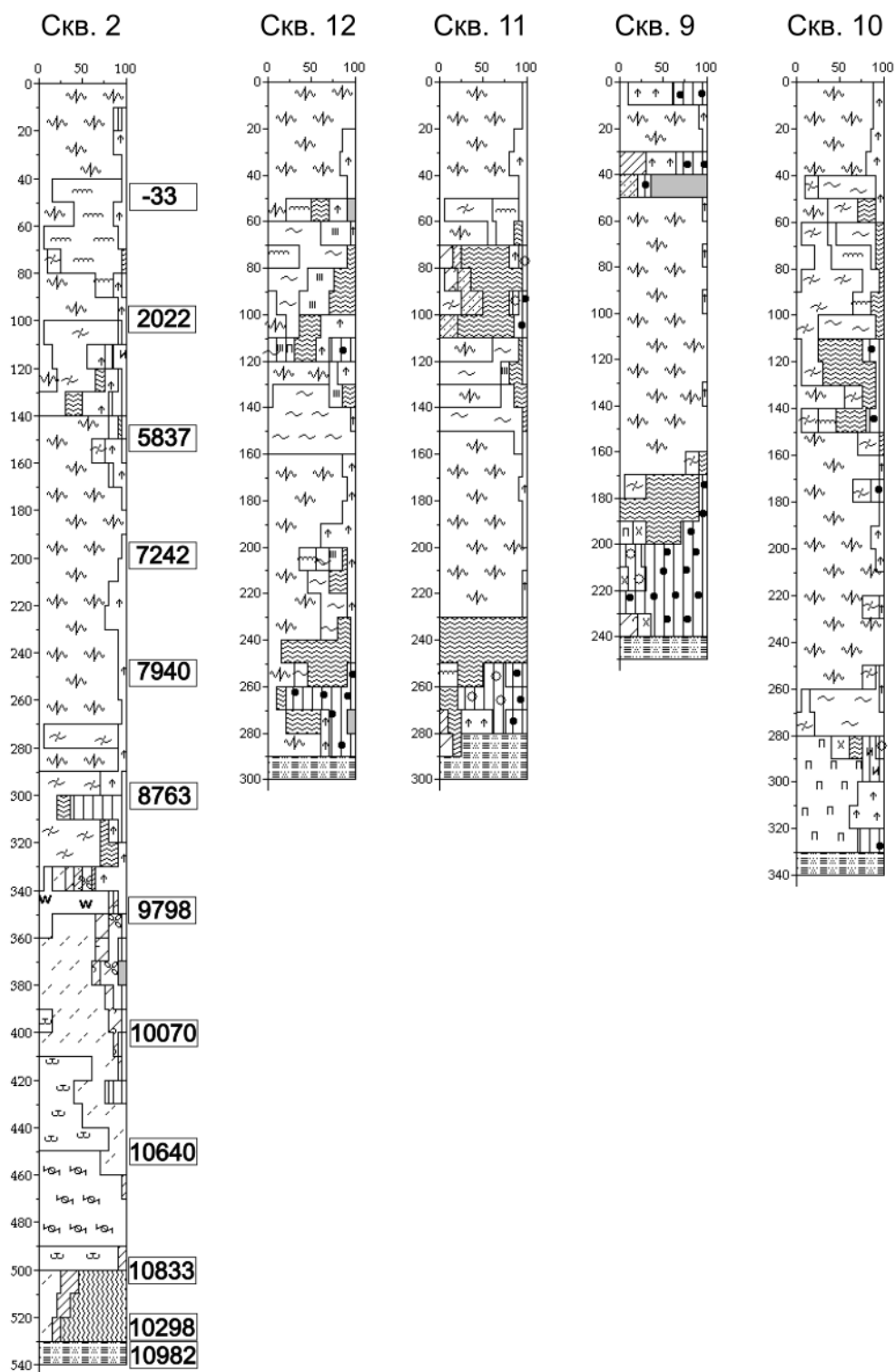


Рис. ПЗ. Ботанический состав торфяных скважин вдоль восточного профиля. Число в рамке — возраст, кал. лет назад. Даты указаны по данным статей [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

Fig. ПЗ. Macrofossil of peat cores along the eastern transect. Number in frame — age, cal years BP.

Dates are given according to the data from articles [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

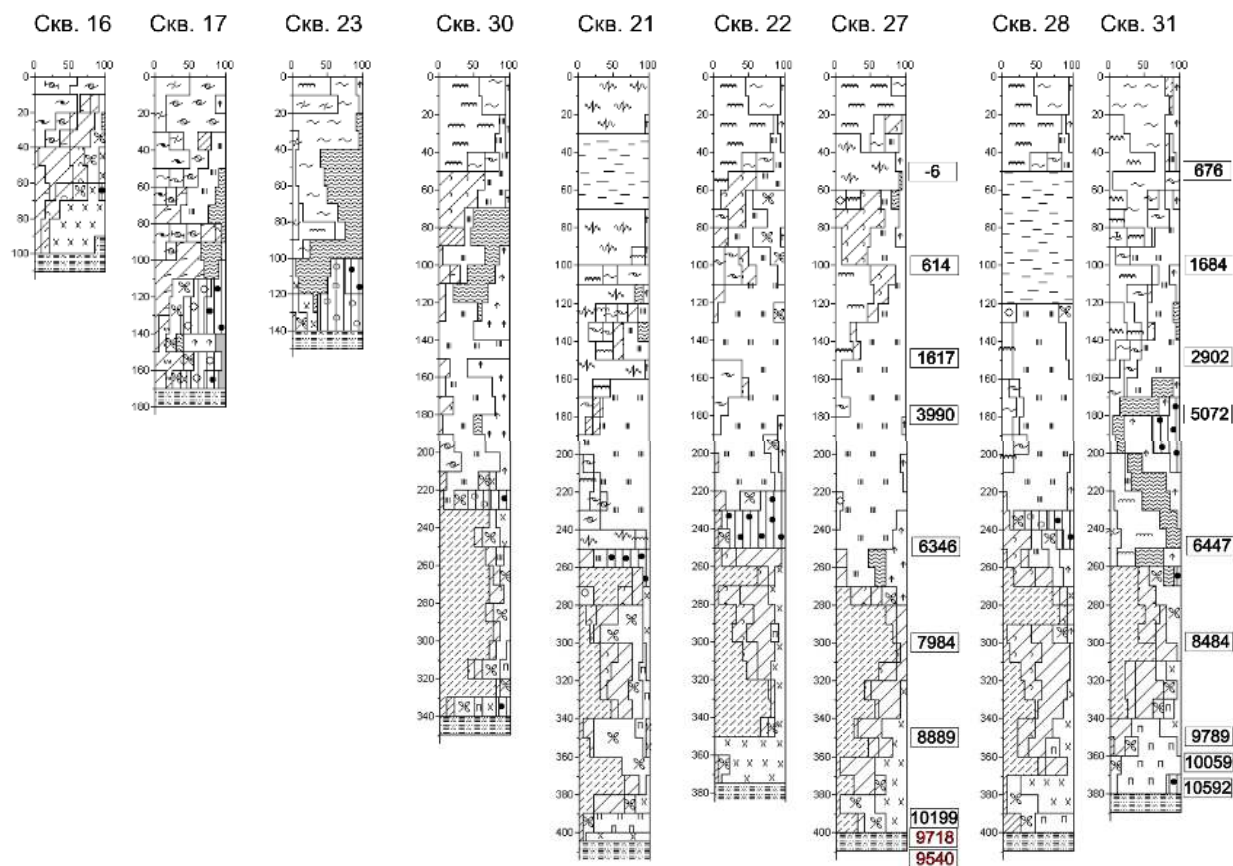


Рис. П4. Ботанический состав торфяных скважин вдоль южного профиля. Число в рамке — возраст, кал. лет назад. Красным цветом выделены возрастные инверсии. Даты указаны по данным статей [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

Fig. P4. Macrofossil of peat cores along the southern transect. Number in frame — age, cal years BP. Red color highlights age inversion. Ages are given according to the data from articles [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

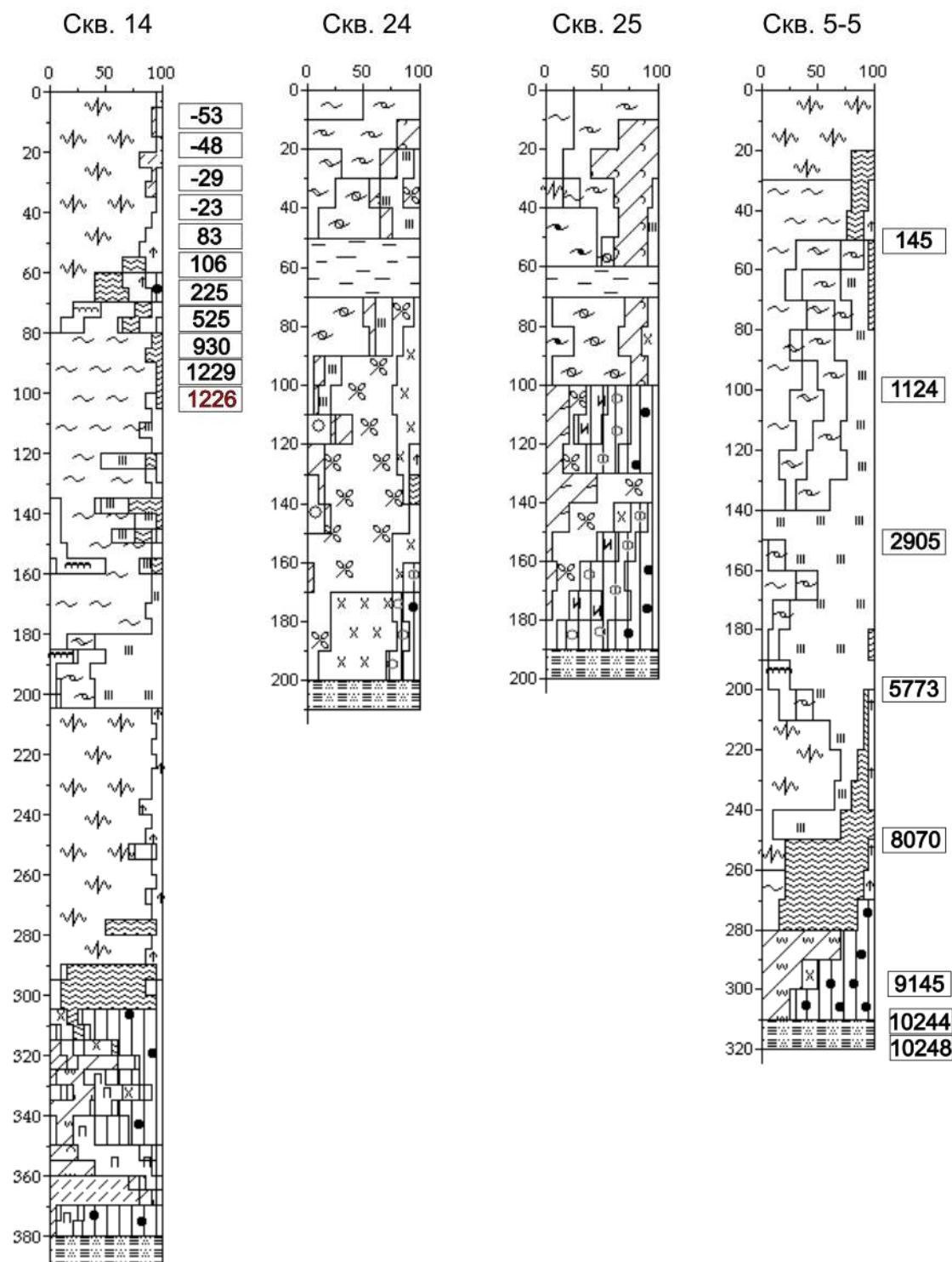


Рис. П5. Ботанический состав торфяных скважин вне профилей. Число в рамке — возраст, кал. лет назад. Красным цветом выделены возрастные инверсии. Даты указаны по данным статей [Lamentowicz et al., 2015; Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

Fig. П5. Macrofossil of peat cores out of transects. Number in frame — age, cal years BP. Red color highlights age inversion. Ages are given according to the data from articles [Lamentowicz et al., 2015; Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023].

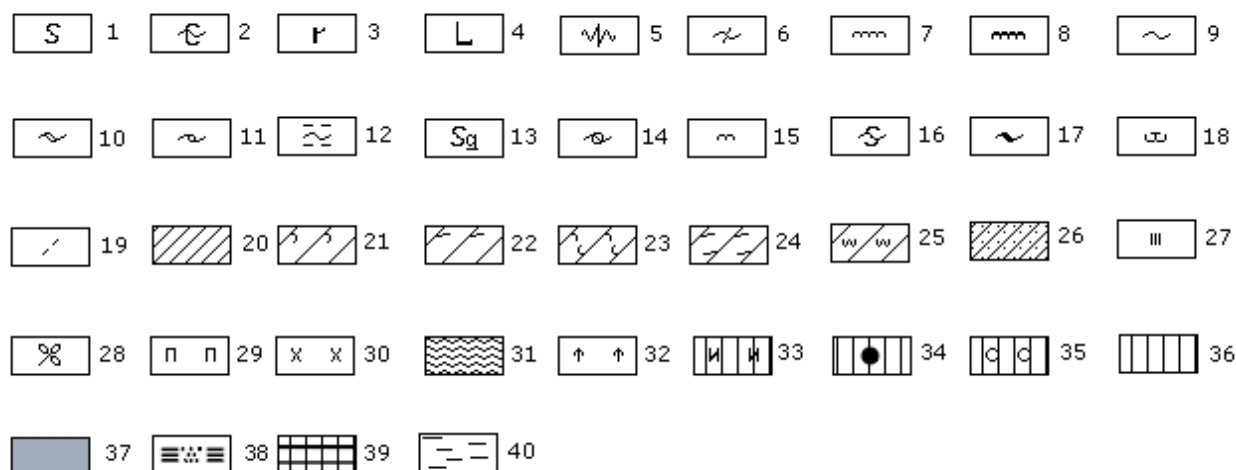


Рис. П6. Обозначения на рисунках 1-4: растительные остатки (1-37): 1 – сфагны, 2 – *Sphagnum capillifolium*, 3 – *Sph. riparium*, 4 – *Sph. lindbergii*, 5 – *Sph. fuscum*, 6 – *Sph. angustifolium*, 7 – *Sph. magellanicum*, 8 – *Sph. papillosum*, 9 – *Sph. balticum*, 10 – *Sph. majus*, 11 – *Sph. jensenii*, 12 – Сфагнум топяной олиготрофный, 13 – *Sph. squarrosum*, 14 – *Sph. fallax*, 15 – *Sph. centrale*, 16 – *Sph. subsecundum*, 17 – Сфагнум мезотрофный, 18 – *Sph. teres*, 19 – Гипновые мхи, 20 – Осоки, 21 – *C. limosa*, 22 – *C. rostrata*, 23 – *C. lasiocarpa*, 24 – *C. cespitosa*, 25 – *C. juncella*, 26 – *C. globularis*, 27 – Шейхцерия, 28 – Вахта, 29 – папоротник, 30 – Хвощ, 31 – Пушица, 32 – кустарнички, 33 – кора и древесина ивы, 34 – кора и древесина березы, 35 – кора и древесина ели, 36 – кора и древесина сосны, 37 – неопределенные травяные остатки; 38 – минеральный грунт; 39 – сапропель; 40 – вода.

Fig. П6. Legend for Figures 1-4: plant remains (1-37): 1 – *sphagna*, 2 – *Sphagnum. capillifolium*, 3 – *Sph. riparium*, 4 – *Sph. lindbergii*, 5 – *Sph. fuscum*, 6 – *Sph. angustifolium*, 7 – *Sph. magellanicum*, 8 – *Sph. papillosum*, 9 – *Sph. balticum*, 10 – *Sph. majus*, 11 – *Sph. jensenii*, 12 – Oligotrophic hollow *Sphagnum*, 13 – *Sph. squarrosum*, 14 – *Sph. fallax*, 15 – *Sph. centrale*, 16 – *Sph. subsecundum*, 17 – Mesotrophic *Sphagnum*, 18 – *Sph. teres*, 19 – Hypnaceae mosses, 20 – Sedges, 21 – *C. limosa*, 22 – *C. rostrata*, 23 – *C. lasiocarpa*, 24 – *C. cespitosa*, 25 – *C. juncella*, 26 – *C. globularis*, 27 – *Scheuchzeria*, 28 – *Menyanthes*, 29 – fern, 30 – *Equisetum*, 31 – *Eriophorum*, 32 – dwarf shrubs, 33 – willow bark and wood, 34 – birch bark and wood, 35 – spruce bark and wood, 36 – pine bark and wood, 37 – unidentified herbaceous remains; 38 – mineral substrate; 39 – gyttja; 40 – water.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 APPENDIX 2

Таблица П2. Встречаемость видов торфа
Table П2. Peat type occurrence

Вид торфа / Peat species	Тип торфа/ Peat types	Встречаемость, % / Occurrence, %
Фускум / <i>Fuscum</i>	О	22.4
Сфагновый мочажинный / <i>Sphagnum</i> hollow	О	13.9
Шейхцерицево-сфагновый / <i>Scheuchzeria-Sphagnum</i>	О	6.49
Травяной / Herbaceous	Е	6.29
Шейхцерицевый / <i>Scheuchzeria</i>	М	4.79
Пушицево-сфагновый / <i>Eriophorum-Sphagnum</i>	О	4.19
Травяной / Herbaceous	М	3.79
Сфагновый верховой / Raised bog <i>Sphagnum</i>	О	3.69
Осоково-гипновый / Sedge-hypnum	Е	3.59
Древесный / Woody	Е	3.49
Травяно-сфагновый / Herbaceous- <i>Sphagnum</i>	О	3.39
Травяно-гипновый / Herbaceous-hypnum	Е	2.4
Шейхцерицевый / <i>Scheuchzeria</i>	О	1.9
Древесно-травяной / Woody-herbaceous	Е	1.6
Травяно-сфагновый / Herbaceous- <i>Sphagnum</i>	М	1.4
Пушицевый / <i>Eriophorum</i>	О	1.3
Древесно-травяной / Woody-herbaceous	М	1.3
Папоротниковый / Fern	Е	1.3
Шейхцерицево-сфагновый / <i>Scheuchzeria-Sphagnum</i>	М	1.2

Примечание: типы торфа: О – верховой, М – переходный, Е – низинный.

Note: Peat types: ombrotrophic (O), mesotrophic (M), eutrophic (E).

ЛИТЕРАТУРА

- Abakumov E., Zarov E.A., Shevchenko E.V., Nizamutdinov T., Polyakov V., Lapshina E.D. 2025. Depth-Dependent Molecular Composition of Peat Organic Matter Revealed by ¹³C NMR Spectroscopy in the Mukhrino Carbon Supersite (Khanty-Mansi Region, Russia). *Molecules*, 30(18): 3663. DOI:10.3390/molecules30183663
- Amon L., Blaus A., Alliksaar T., Heinsalu A., Lapshina E., Liiv M., Reitalu T., Vassiljev J., Veski S. 2020. Postglacial flooding and vegetation history on the Ob River terrace, central Western Siberia based on the palaeoecological record from Lake Svetlenkoye. *The Holocene*, 30(5): 618-631. DOI: 10.1177/0959683619895582
- 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 Ya., Mazei Yu., 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. *The Holocene*, 09596836251387252.
- Anisimov O.A., Zimov S.A., Volodin E.M., Lavrov S.A. 2020. Methane emission in the Russian permafrost zone and evaluation of its impact on global climate. *Russian Meteorology and Hydrology*, 45(5): 377-385. . DOI: 10.3103/S106837392005009X
- Aravena R., Wassenaar L.I. 1993. Dissolved organic carbon and methane in a regional confined aquifer, southern Ontario, Canada: Carbon isotope evidence for associated subsurface sources. *Applied Geochemistry*, 8(5): 483-493. . DOI: 10.1016/0883-2927(93)90077-T
- Beilman D.W., MacDonald G.M., Smith L.C., Reimer P.J. 2009. Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years. *Global Biogeochemical Cycles*, 23: GB1012. DOI: 10.1029/2007GB003112
- Blaauw M. 2020. clam: Classical Age-Depth Modelling of Cores from Deposits. R package. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/clam/index.html> (Last accessed Apr 2022).
- Bleuten W., Lapshina E.D. (Eds.) 2001. *Carbon storage and atmospheric exchange by West Siberian peatlands*. Utrecht University, 261 p.
- Blyakharchuk T., Shefer N., Ponomareva O., Li H.C. 2023. Late Quaternary Dynamics of Landscape and Climate in the North of the West Siberian Plain Revealed by Paleoeological Studies of Peat and Lake Sediments. *Quaternary*, 7(1): 1. DOI: 10.3390/quat7010001
- Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. 2011. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. *Mires and Peat*, 7: 1–10.
- Charman D.J., Aravena R., Warner B.G. 1994. Carbon dynamics in a forested peatland in north-eastern Ontario, Canada. *Journal of Ecology*, 55-62. DOI: 10.2307/2261385

- Clymo R.S., Turunen J., Tolonen K. 1998. Carbon accumulation in peatland. *Oikos*, 368-388. DOI: 10.2307/3547057
- Dyukarev E.A. 2003. Programma dlya postroeniya diagramm raspredeleniya rastitel'nykh ostatkov i tipov torfa po glubine. In: *Pyatye Sibirskoe soveshchanie po klimato-ekologicheskomu monitoring: materialy soveshchaniya*, p. 171, Izd-vo TNTs SO RAN, Tomsk (in Russian).
- Freeman C., Fenner N., Ostle N.J., Kang H., Dowrick D.J., Reynolds B., Lock M.A., Hughes S., Hudson J. 2004. Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels. *Nature*, 430(6996): 195-198. DOI: 10.1038/nature02707
- Frey K.E., Smith L.C. 2005. Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100. *Geophysical Research Letters*, 32(9). DOI: 10.1029/2004GL020225
- Glebov F.Z., Karpenko L.V., Dashkovskaya I.S. 2002. Climatic Changes, Successions of Peatlands and Zonal Vegetation, and Peat Accumulation Dynamics in the Holocene (the West-Siberia Peat Profile 'Vodorasdel'). *Climatic Change*, 55(1): 175-181. DOI: 10.1023/A:1020216922975
- Hua Q., Barbetti M., Rakowski Z. 2013. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010. *Radiocarbon* 55: 2059-2072. DOI: 10.2458/azu_js_rc.v55i2.16177
- Ivanov K.E., Novikov S.M. (eds.) 1976. *Mires of Western Siberia, Their Structure and Hydrological Regime*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 448 p. (in Russian). [Иванов К.Е., Новиков С.М. (ред.) Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим // Л.: Гидрометеиздат, 1976. 448 с.].
- Gvozdet'skii N.A., Krivolutskii A.E., Makunina A.A. 1973. *Physical-Geographical Zoning of the Tyumen Region*. Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, Moscow, 267 p. (in Russian). [Гвоздецкий Н.А., Криволюцкий А.Е., Макунина А.А. Физико-географическое районирование Тюменской области. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 267 с.].
- Kats N.Ya. 1977. *Atlas of Plant Remains in Peat*. Nedra, Moscow, 167 p. (in Russian). [Кац Н.Я. Атлас растительных остатков в торфе. М.: Недра, 1977. 167 с.].
- Khotinskii N.A. 1982. *Holocene Chronosections: Controversial Issues of Holocene Paleogeography*. Razvitiye prirody territorii SSSR v pozdnem pleistocene i golocene: 142-147 (in Russian). [Хотинский Н.А. Голоценовые хроносрезы: дискуссионные проблемы палеогеографии голоцена. Развитие природы территории СССР в позднем плейстоцене и голоцене. 1982. С. 142-147].
- Kremenetski K.V., Velichko A.A., Borisova O.K., MacDonald G.M., Smith L.C., Frey K.E., Orlova L.A. 2003. Peatlands of the Western Siberian lowlands: current knowledge on zonation, carbon content and Late Quaternary history. *Quaternary Science Reviews*, 22: 703-723. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00196-8
- Lamentowicz M., Słowiński M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszan K., Lapshina E., Gilbert D., Buttler A., Fiałkiewicz-Kozieł B., Jassey V., Laggoun-Defarge, F., Kołaczek P. 2015. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive. *Quaternary Research*, 84(3): 312-325. DOI: 10.1016/j.yqres.2015.09.002
- Langdon P.G., Brown A.G., Caseldine C.J., Blockley S.P.E., Stuijts I. 2012. Regional climate change from peat stratigraphy for the mid-to late Holocene in central Ireland. *Quaternary International*, 268: 145-155. DOI: 10.1016/j.quaint.2011.11.018
- 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
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. 2001. Mire Systems of Western Siberia and Their Environmental Significance. Izd-vo Tyumenskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Tumen, 584 p. (in Russian). [Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукa З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2001. 584 с.].
- Matukhin R.G. 2000. Classification of Peats and Peat Deposits in Western Siberia. Novosibirsk. 124 p. (in Russian). [Матухин Р.Г. Классификация торфов и торфяных залежей Западной Сибири. Новосибирск, 2000. 124 с.].
- Pearson R.G., Phillips S.J., Loranty M.M., Beck P.S., Damoulas T., Knight S.J., Goetz S.J. 2013. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature Climate Change*, 3(7): 673-677. DOI: 10.1038/nclimate1858
- Ratcliffe J.L., Creevy A., Andersen R., Zarov E., Gaffney P.P., Taggart M.A., Mazei Yu., 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: 816-828. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.06.276
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62, 725-757. DOI:10.1017/RDC.2020.41.
- Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. 2004. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: GB3004. DOI: 10.1029/2003GB002190
- Smith L.C., MacDonald G.M., Velichko A.A., Beilman D.W., Borisova O.K., Frey K.E., Kremenetski K.V., Sheng Y. 2004. Siberian Peatlands a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene. *Science*, 303: 353-356. DOI: 10.1126/science.1090553
- Steinhof A. 2016. Accelerator Mass Spectrometry of Radiocarbon. In: *Radiocarbon and Climate Change*, (E.A. Schuur, E.R. Druffel, S.E. Trumbore, eds.), p. 253-278, Springer International Publishing, Cham.
- Steinhof A., Altenburg M., Machts H. 2017. Sample preparation at the Jena 14C laboratory. *Radiocarbon*, 59(3): 815-830. DOI: 10.1017/RDC.2017.50
- Swindles G.T., Morris P.J., Mullan D.J., Payne R.J., Roland T.P., Amesbury M.J. et al. 2019. Widespread drying of European peatlands in recent centuries. *Nature Geoscience*, 12(11): 922-928. DOI: 10.1038/s41561-019-0462-z
- Terentieva I.E., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Sabrekov A.F., Maksyutov S. 2016. Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: implications for methane emissions. *Biogeosciences*, 13(16): 4615-4626. DOI:10.5194/bg-13-4615-2016

- Tsyganov A.N., Zarov E.A., Mazei Y.A., Kulkov M.G., Babeshko K.V., Yushkovets S.Y. et al. 2021. Key periods of peatland development and environmental changes in the middle taiga zone of Western Siberia during the Holocene. *Ambio*, 50(11): 1896-1909. DOI: 10.1007/s13280-021-01545-7
- Turunen J., Tomppo E., Tolonen K., Reinikainen A. 2001. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland — application to boreal and subarctic regions. *The Holocene*, 12(1): 69-80. DOI: 10.1191/0959683602hl522rp
- Tyuremnov S.N. 1976. *Torfyanye mestorozhdeniya (3-e izd.)*. Nedra, Moscow, 488 p. (in Russian). [Тюремнов С.Н. 1976. Торфяные месторождения (3 издание). М.: Недра, 488 с.]
- Xu J., Morris P.J., Liu J., Holden J. 2018. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *Catena*, 160: 134-140. DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010
- Yu Z., Loisel J., Brosseau D.P., Beilman D.W., Hunt S.J. 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 37(13): L13402. DOI: 10.1029/2010GL043584
- Yu Z., Loisel J., Charman D.J., Beilman D.W., Camill P. 2014. Holocene peatland carbon dynamics in the circum-Arctic region: An introduction. *The Holocene*, 24(9): 1021-1027. DOI: 10.1177/0959683614540730
- Zarov E.A., Lapshina E.D., Kuhlmann I., Schulze E.D. 2023. Carbon Accumulation and the Possibility of Carbon Losses by Vertical Movement of Dissolved Organic Carbon in Western Siberian Peatlands. *Forests*, 14(12): 2393. DOI: 10.3390/f14122393
- 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. DOI: 10.19189/001c.154769
- Zou J., Ziegler A.D., Chen D., McNicol G., Ciais P., Jiang X., Zheng C., Wu J., Wu J., Lin Z., He X., Brown L., Holder J., Ramchunder S., Chen A., Zeng Z. 2022. Rewetting Global Wetlands Effectively Reduces Major Greenhouse Gas Emissions. *Nature Geoscience*, 15: 627-632. DOI: 10.1038/s41561-022-00989-0

Поступила в редакцию: 25.12.2025
Переработанный вариант: 24.02. 2026
Принято в печать: 15.03. 2026
Опубликована: 31.03. 2026