

## FEATURES OF CARBON FORMS DISTRIBUTION IN PEAT DEPOSITS OF AN OLIGOTROPHIC BOG IN THE KONDINSKY LAKES NATURE PARK

Shanyova V.S.\*, Batrshina V.R., Rakhova S.E.

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», г. Ханты-Мансийск

\*SHANYOVA.VIKA@mail.ru

**Citation:** Shanyova V.S., Batrshina V.R., Rakhova S.E. 2025. Features of Carbon Forms Distribution in Peat Deposits of an Oligotrophic Bog in the Kondinsky Lakes Nature Park. *Environmental dynamics and global climate change*. 16(1): 13–32.

**DOI:** 10.18822/edgccc634187

В статье представлены результаты исследования трех стратиграфических профилей и состава растворенного органического вещества (РОВ) ненарушенных участков олиготрофного болота территории природного парка «Кондинские озера». Целью данного исследования была оценка влияния ботанического состава и физико-химических параметров торфяной залежи на количество и состав растворенного органического углерода (РОУ). Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: определить физико-химические показатели торфа и изучить стратиграфию торфяной залежи, определить содержание органического углерода, концентрацию и состав РОУ в торфяной залежи. Глубина торфяной залежи изменялась в пределах 3.5-4 м. Средняя концентрация органического углерода в торфе составляет  $50 \pm 9.8\%$ , а средний запас органического углерода в торфяной залежи составляет  $205 \pm 21.73$  кг/м<sup>2</sup>. В стратиграфическом профиле торфяной залежи выделяется прослойка эвтрофного торфа, сменяющегося на мезотрофный, а после на олиготрофный торф, который характеризуется преобладанием сфагновых мхов (*Sph. balticum*, *Sph. majus*, *Sph. divinum* и *Sph. fuscum*). Обнаружено, что по шкале Л.Г. Раменского высокий показатель увлажнения (УВ) соответствует низкому значению показателя богатства и засоления (БЗ). Концентрации РОУ имеют отрицательный коэффициент корреляции с УВ и положительный коэффициент с содержанием пушицы, шейхцерии и кустарничков в стратиграфическом профиле. Снижение концентрации РОУ наблюдается при преобладании *Sph. balticum* и *Sph. divinum*. Среднее содержание РОУ в торфяной залежи имеет значение  $241.27 \pm 52.48$  мг/л. Показатель  $SUVA_{254}$  имеет максимальные значения в среднем  $0.55 \pm 0.5$  на глубинах 100-200 см. С увеличением содержания *Sph. fuscum* и *Sph. balticum* показатель  $SUVA_{254}$  снижается до 0.36. Придонный слой всех профилей характеризуется минимальными значениями  $SUVA_{254}$  в связи с присутствием примеси минерального грунта. Гуминовые вещества и средний молекулярный вес соединений зависимы друг от друга. Коэффициент среднего молекулярного веса органических соединений по всей глубине имеет среднее значение  $4.8 \pm 0.8$ , а средние значения коэффициента соотношения гумусовых веществ равны  $7.13 \pm 3.2$ .

**Ключевые слова:** Кондинские озера, природный парк, торфяной керн, РОУ,  $SUVA_{254}$ , стратиграфия.

Wetland ecosystems play a key role in the global carbon cycle, accumulating significant amounts of carbon and influencing climate processes. The study of the dynamics of carbon accumulation, dissolved organic carbon (DOC) and the stratigraphy of peat deposits allows us to assess the impact of climate change on wetlands. The results of the work are important for predicting the response of ecosystems to global warming and developing measures for their conservation. In this study, we examined three stratigraphic profiles and the composition of dissolved organic matter (DOM) of undisturbed areas of an oligotrophic bog in the Kondinsky Lakes Nature Park.

The aim of this study was to assess the influence of the macrofossil and physicochemical parameters of the peat deposit on the amount and composition of dissolved organic carbon (DOC). To attain this aim, the following tasks were set: to determine the physicochemical characteristics of peat, study the stratigraphy of the peat deposit and determine the content of organic carbon, the concentration and composition of DOC in the peat deposit. Peat cores were collected in the spring (March 2023). The depth of the peat deposit varied within 3.5-4 m. In this paper, the following methods were used: stratigraphic method, peat moisture determination, elemental analysis of organic carbon, pH, determination of spectral characteristics, calculation of organic carbon reserves,

moisture index (MI) and active soil richness and salinity (RS) indices according to the L.G. Ramensky scales. Peat moisture content was determined by the difference in the mass of the wet and dry sample. Total organic carbon content was determined by the EA-3000 elemental analyzer. Dissolved organic carbon was determined by a Flash-2000 elemental analyzer (Thermo Scientific, USA). A binocular microscope (10-40× magnification; Zeiss Axiostar, Jena, Germany) was used to determine plant residues and the degree of decomposition. The methodology was carried out in accordance with the protocols [Mauquoy, Van Geell, 2013] using a database of key samples, i.e. a collection of plant residues that were found in the region and used to determine the macrofossil of peat. The calculation was made in the integrated botanical information system IBIS 7.2. Measurements of spectral characteristics were made by a UV/Visible Spectrophotometer T8DCS (PERSEE, China) at wavelengths of 250, 254, 365, 400 and 600 nm. In the UV-Win program, a baseline determining zero light absorption was constructed in relation to deionized water. The pH of peat was measured potentiometrically (HANNA Instruments, Edge, USA) in a suspension of a peat sample. The data analysis was performed in R, utilizing cluster analysis and correlation testing.

The average concentration of organic carbon in peat is  $50 \pm 9.8\%$ , and the average reserve of organic carbon in a peat deposit is  $205 \pm 21.73 \text{ kg/m}^2$ . In the stratigraphic profile of the peat deposit, a layer of eutrophic peat is identified and further replaced by mesotrophic, and then by oligotrophic peat, which is characterized by the predominance of sphagnum mosses (*Sph. balticum*, *Sph. majus*, *Sph. divinum* and *Sph. fuscum*). It was found that a high moisture index (MI) corresponds to a low value of the richness and salinity index (RS) according to the L.G. Ramenskii scale. DOC concentrations have a negative correlation coefficient with MI and a positive correlation coefficient with the content of cotton grass, *Scheuchzeria* and dwarf shrubs in the stratigraphic profile. A decrease in DOC concentrations is observed with the predominance of *Sph. balticum* and *Sph. divinum*. The average DOC concentration in the peat deposit is  $241.27 \pm 52.48 \text{ mg/l}$ . The  $\text{SUVA}_{254}$  index has maximum values of  $0.55 \pm 0.5$  on average at depths of 100-200 cm. With an increase in the content of *Sph. fuscum* and *Sph. balticum*, the  $\text{SUVA}_{254}$  index decreases to 0.36. The bottom layer of all profiles is characterized by minimum  $\text{SUVA}_{254}$  values due to the presence of mineral soil impurities. The coefficient of the average molecular weight of organic compounds over the entire depth has an average value of  $4.8 \pm 0.8$ , and the average values of the humic substance ratio coefficient are  $7.13 \pm 3.2$ .

**Key words:** Kondinsky lakes, nature part, peat core, DOC,  $\text{SUVA}_{254}$ , stratigraphy.

#### Используемые сокращения

РОУ – растворенный органический углерод  
РОВ – растворенное органическое вещество  
УБВ – уровень болотных вод  
ГВ – коэффициент соотношения гумусовых веществ  
ГК – гуминовые кислоты  
ФК – фульвокислоты  
МВ – коэффициент среднего молекулярного веса  
УВ – увлажнение  
БЗ – активное богатство и засоление почв

## ВВЕДЕНИЕ

Торфяники являются крупнейшим резервуаром долгосрочного накопления атмосферного углерода. Благодаря наличию торфа и болотной растительности болота связывают в несколько раз больше углерода на единицу площади, чем другие наземные экосистемы, включая леса [Minayeva, Sirin, 2012]. Баланс углерода природных экосистем определяется соотношением процессов поглощения углерода растениями и его выделения [Golovatskaya et al., 2022]. Поток углерода из болот, особенно в северных широтах, значительно влияет на климат [Lee, Romero, 2023]. Различные колебания климата, например повышение температуры, могут увеличивать поток углерода из болот, что ведет к положительной обратной связи – дополнительному нагреву атмосферы [Lee, Romero, 2023]. Таким образом, составление прогноза изменения климата планеты и построение единой модели, учитывающей содержание парниковых газов, является сложной задачей.

В процессе роста болотной растительности, а также под воздействием редуцентов углерод частично возвращается в атмосферу в виде углекислого газа и метана [Leonova, 2023]. Оставшаяся часть углерода депонируется на длительный срок в торфяной залежи. Для торфяников северного полушария средняя скорость накопления торфа оценивается в  $0.067 \pm 0.018$  см год<sup>-1</sup> (в диапазоне от 0.013 до 0.332 см год<sup>-1</sup>), а скорость накопления углерода составляет  $38.56 \pm 12.21$  г м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup> (в диапазоне от 28.46 до 57.91 г м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>) [Turunen et al., 2001].

В России наибольшая площадь болотных экосистем (592 440 км<sup>2</sup>) сосредоточена на территории Западной Сибири [Sheng et al., 2004], где накопленное количество углерода оценивается в 473-621 Гт [Yu et al., 2010]. Наиболее древние слои торфа имеют возраст 9-12 тысяч лет, а средняя его мощность составляет 3-4 м [Zemcov et al., 1998; Macdonald et al., 2006].

Динамика накопления углерода не остается постоянной на протяжении всего существования болот. На данный процесс оказывают влияние многие факторы, главным из которых является смена растительности и изменение гидрологического режима болот [Tsyganov et al., 2021; Zarov et al., 2023]. Таким образом, комплексное изучение структуры болот позволяет оценить скорость накопления углерода и воссоздать картину палеоклимата (по составу растительных остатков) и палеогидрологических условий (по остаткам раковинных амеб) [Tsyganov et al., 2021; Halaš et al., 2023; Marcisz et al., 2020]. Данные, полученные при исследовании болот, позволяют понять взаимообратные связи между биотой и климатом и прогнозировать реакцию экосистем на климатические изменения в будущем. Стратиграфический анализ торфяных залежей позволяет выявить региональные аспекты генезиса и развития болотных массивов.

В процессе разложения органического вещества часть элементов из подстилки и торфа переходит в растворимую форму, что приводит к перераспределению растворенной органики по торфяной толще. Фракции, проходящие через фильтр с размером пор 0.45 мкм, известны как растворенный органический углерод (РОУ) [Kolka et al., 2008]. Типы растительных сообществ влияют на процессы формирования торфа и определяют состав и концентрацию РОУ [Armstrong et al., 2012]. Также концентрация РОУ зависит от среднегодовой температуры воздуха [Freeman, 2001], концентрации углекислого газа в атмосфере и уровня болотных вод (УБВ) [Kolka et al., 2008]. Кроме того, существуют локальные факторы, контролирующие вынос РОУ с торфяников: размер водосборной площади, глубина залегания грунтовых вод и тип почвы [Worrall et al., 2008].

Изучение концентрации РОУ важно для определения углеродного баланса торфяников [Waddington, Roulet, 1997]. Ожидаемое глобальное потепление может способствовать увеличению концентрации РОУ в воде, стекающей с заболоченных водосборов [Freeman, 2001]. Это в свою очередь приведет к увеличению концентрации РОУ в водах более крупных водотоков, где его часть минерализуется и возвращается в атмосферу в виде парниковых газов [Frey, Smith, 2005]. При этом часть растворенной органики с высокой долей ароматических соединений в составе более устойчива к разложению и способна мигрировать на значительные расстояния.

Ароматичность является важным показателем, характеризующим состав растворенного органического вещества (РОВ), повышение значений которого отражает увеличение скорости переноса и распределения загрязняющих веществ в водные системы [William et al., 2016]. Для оценки ароматичности РОВ используется показатель SUVA<sub>254</sub> (specific ultraviolet absorption) – соотношение нормализованного значения поглощения при 254 нм к содержанию РОУ [Weishaar et al., 2003; Pittaway, 2014]. Следовательно, чем выше содержание ароматических соединений в составе органических веществ, тем выше поглощение в данном диапазоне.

В состав РОВ входят гумусовые вещества, которые представляют собой смесь фракций с различной молекулярной массой и химическим составом; они обладают высокой миграционной способностью и участвуют в углеродном цикле биосферы [Bolin et al., 1979; Inisheva et al., 2013]. Известно, что гумусовые вещества традиционно делят на гуминовые кислоты (ГК) и фульвокислоты (ФК). ГК являются гидрофобной фракцией с более высокой молекулярной массой и размером от 2 до 50 нанометров, которая подавляет подвижность и способствует его накоплению. ФК определяют как гидрофильную низкомолекулярную фракцию с размером около 2 нанометров. Данное соединение характеризуется высокой

подвижностью [Bai et al., 2018]. Доля ФК в болотных водах на порядок превышает содержание ГК, что связано с высоким вкладом в их структуру карбоксильных групп и фенольных оксигрупп [Thurman, 1985; Bolin et al., 1979]. В ходе роста торфяной залежи в глубинных слоях происходит потеря неустойчивых ФК и накопление ГК, которые со временем зрелости торфа становятся более концентрированными и устойчивыми [Savicheva et al., 2003; Moore, 1987].

Средний молекулярный вес РОВ является ключевым фактором, влияющим на физические, химические и биологические характеристики. Он определяет фотореакционную способность, оптические свойства и биодоступность РОВ, а также сорбционную способность тяжелых металлов и гидрофобные связывающие свойства [Chin, 1997]. Данный показатель изменяется в зависимости от качества и количества молекул, а также от фракций органических и неорганических частей и функциональных групп, образующих эти соединения [Uyguner, Bekbolet, 2005, Lou, Xie, 2006; Olefeldt, Roulet, 2012].

Значения рН имеют значительное влияние на высвобождение РОУ во время стока, поскольку он определяет сорбционную способность и растворимость органического углерода [Worrall F et al., 2008].

На территории природного парка «Кондинские озера» им. Л.Ф. Сташкевича проведены единичные работы, описывающие скорость прироста мхов [Kosykh et al., 2017], мониторинг дереворазрушающих микосообществ [Stavishenko, 2008], анализ геохимических особенностей торфяных залежей [Golovaskaya, Smirnova 2021], флористические исследования [Bespalova, 2022; Korotkikh et al., 2022]. При этом отсутствуют исследования, направленные на оценку содержания углерода в торфяной залежи, концентрации РОУ и спектральные характеристики. Несмотря на то, что разный ботанический состав и экологические условия торфообразования являются основной причиной широкой изменчивости химического состава органического вещества торфов, работы в данном направлении весьма ограничены.

Актуальность данного исследования заключается в изучении стратиграфии нетронутого олиготрофного болота для получения информации о смене растительных сообществ и климатических и экологических условий. Поток РОУ является важной функцией в цикле углерода болотных экосистем, влияющем на биогеохимические процессы и качество воды. Результаты исследования могут быть использованы для оценки состояния и устойчивости болотных экосистем, а также для разработки мер по их сохранению и рациональному использованию.

Целью данного исследования была оценка влияния ботанического состава и физико-химических параметров торфяной залежи на количество и состав РОУ.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Определить физико-химические показатели торфа;
2. Изучить стратиграфию торфяной залежи;
3. Определить содержание органического углерода в торфяной залежи;
4. Определить концентрацию и состав РОУ в торфяной залежи.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в Советском районе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на территории природного парка «Кондинские озера» им. Л.Ф. Сташкевича. Территория расположена на левом берегу реки Конды и относится к Кондинской физико-географической провинции в среднетаежной подзоне тайги [Vogonov et al., 1971].

Климат природного парка «Кондинские озера» характеризуется коротким, сравнительно теплым летом и суровой продолжительной зимой. Продолжительность зимнего периода составляет около 25 недель. Самый холодный месяц – январь со средней температурой  $-19^{\circ}\text{C}$ . Самый теплый месяц – июль, средняя температура которого достигает  $17.1^{\circ}\text{C}$ . Природный парк находится на территории с достаточным увлажнением. Среднегодовое количество осадков составляет 500-550 мм, основное количество которых выпадает в теплый период года – с апреля по октябрь (82%) с максимумом в июле – августе. Минимальные значения выпадающих осадков приходятся на зимние месяцы [Levasheva et al., 2010].

В растительном покрове преобладают сосновые зеленомошные, лишайниковые и елово-кедровые зеленомошные леса. Среди болотных сообществ выделены следующие типы: сосново-кустарничково-сфагновые сообщества (рямы); кустарничково-сфагновые сообщества с чередующимися грядами и мочажинами; осоково-сфагновые сообщества на транзитных водотоках и в комплексных мезотрофных болотах; вахтово-сфагновые сообщества в участках выклинивания грунтовых вод и топей; осоково-вахтово-моховые сообщества в увлажненной части топей [Korotkikh et al., 2018].

Торфяная залежь имеет глубину 3-4 м с минеральным дном, сложенным супесями, песками и суглинками [Syt'eva, 2017; Lapshina et al., 2020]. Основными растениями-торфообразователями в современном растительном покрове являются *Sph. divinum*, *Sph. balticum*, *Sph. angustifolium*, *E. vaginatum*, *Scheuchzeria palustris*, *C. limosa*, *C. rostrata* и древесные остатки.

### Отбор торфа

Торфяные керны были отобраны в весенний период (март 2023 года) с помощью пробоотборника типа «Русский бур» (производства Eijkelkamp, длина 0.5 м, ширина 5 см) на всю глубину торфяной залежи. В мочажинных сообществах было отобрано три торфяных керна: Cond-1 (60.852855° с.ш. 63.502405° в.д., общая глубина 3.4 м), Cond-2 (60.854300° с.ш. 63.505760° в.д., общая глубина 2.9 м) и Cond-3 (60.855770° с.ш. 63.509037° в.д., общая глубина 3.4 м). Каждый образец торфяного керна длиной 50 см был помещен в С-образные кассеты из пенополиэтилена и обтянут стретч-пленкой, промаркирован и отправлен на хранение при температуре -20°C в лабораторию (Югорский государственный университет) [Batrshina et al., 2023]. Верхние 50 см не были отобраны для анализа в связи с трудностью отбора проб.

### Пробоподготовка

В лаборатории торф был разморожен и подготовлен для дальнейших анализов. Торфяной kern разделили на десятисантиметровые образцы, каждый из которых был разделен вдоль на три сегмента. Первый сегмент использовался для определения элементного состава и запаса органического углерода, второй сегмент – для определения содержания РОУ и его спектральных показателей, а третий – для проведения ботанического анализа. Всего было подготовлено 97 образцов из трех кернов.

### Влажность торфа

Сегмент торфа отправляли в сушильный шкаф VO400cool (Mettmert, Германия) для сушки при температуре 105°C в течение суток, после чего высушенный торф взвешивался. Влажность торфа была определена по разнице массы влажного и сухого образца.

### Элементный анализ (СНН)

Высушенный торф был перемолот до однородного состояния на измельчителе NIMA NM-8300 (Китай). Определение общего содержания органического углерода производилось на элементном анализаторе EA-3000 (EuroVector, Италия) [Batrshina et al., 2023]. Торфа верховых болот Западной Сибири не содержат карбонатов, поэтому общее содержание углерода равно его органической доле [Zarov, 2013]. В ходе анализа образец окислялся на катализаторе (чистая медь и оксид хрома) при температуре 1020°C в токе гелия и избытке чистого кислорода. Разделение смеси происходило хроматографическим методом с определением компонентов на детекторе по теплопроводности (TCD). Калибровка прибора осуществлялась с использованием стандартов Atropine (C = 70.56%, N = 4.84%, H = 8.01%, O = 16.59%) и Alfalfa (C = 42.35%, H = 5.95%, N = 2.91%). Всего было проанализировано 97 торфяных проб.

## **Ботанический анализ и степень разложения**

Образец торфа промывали проточной водой через сито с ячейкой 0.25 мм. Для определения остатков растений использовался бинокулярный микроскоп (увеличение 10-40×; Zeiss Axiostar, Йена, Германия). Методика выполнялась в соответствии с протоколами [Mauquoy, Van Geell, 2013] с применением банка данных ключевых образцов, то есть коллекции остатков растений, которые были найдены в регионе и использовались для определения ботанического состава торфа. Наличие каждого типа растительных остатков было выражено в процентах от общей массы, а типы торфа были определены на основе доминирования видов растений по Матухину [Matukhin et al., 2000]. Степень разложения торфа выражалась как доля гумифицированных веществ к общему количеству неразложившихся растительных остатков. Всего было проанализировано 97 торфяных проб.

## **Расчет запаса органического углерода в слое торфа**

Запас органического углерода в каждом 10-сантиметровом слое торфяной залежи рассчитывался как произведение доли органического углерода и объемного веса торфа, умноженное на мощность торфяного слоя (10 см) на площадь 1 м<sup>2</sup>. Послойное суммирование запасов углерода каждого 10-сантиметрового слоя торфяной залежи позволило определить запас углерода на 1 м<sup>2</sup> [Leonova, 2023; Batrshina et al., 2023].

## **Показатели увлажнения (УВ) и активного богатства и засоления почвы (БЗ) по шкалам Л.Г. Раменского**

Для каждого образца были рассчитаны показатели увлажнения (УВ) – оценки водообеспеченности растений в различных природных зонах и местообитаниях и активного богатства и засоления почвы (БЗ) – наличие питательных элементов для растений в доступной форме. Для расчета показателей увлажнения был использован метод взвешенного усреднения согласно экологическим шкалам Л.Г. Раменского. Расчет производился в интегрированной ботанической информационной системе IBIS 7.2 [Zverev, 2007]. Данная методика была применена к ботаническим описаниям торфа в количестве 97 образцов.

## **Определение РОУ**

Существуют частичные рекомендации относительно методов отбора проб и анализа, что ограничивает получение стандартизированных результатов [Peacock M. et al., 2015]. Для извлечения РОУ из торфяного сегмента навеска торфа (~10-20 г) помещалась в коническую колбу объемом 100 мл, в которую добавлялось 50 мл деионизированной воды. Содержимое колб помещалось в перемешивающее устройство (ЭКРОС 6410) при частоте 200 об/мин в течение 30 минут. Затем содержимое колб переливалось на сито (диаметр ячеек 0.25 мм), установленное на керамической чаше, и отжималось керамической лопаткой [Shanyova, 2023]. Полученный экстракт отбирался в шприц и пропусклся через мембранный фильтр (0.45 мкр) в стеклянные вials (2 мл) [Leenheer, Croue, 2003; Peacock, 2015].

Измерения проводились на элементном анализаторе Flash-2000 (Thermo Scientific, США). Принцип определения содержания органического углерода основан на сжигании образца на катализаторе (чистая медь и оксид меди) при высокой температуре в присутствии избытка кислорода в токе гелия. Газообразные продукты горения проходят через систему восстановительных реакторов и поглотителей, разделяются на хроматографической колонке и детектируются на катарометре. Калибровка осуществлялась по стандарту Urea (C = 22.56%, N = 7.84%, H = 15.01%, O = 18.59%). Всего было проанализировано 97 водных экстрактов.

## **Определение спектральных характеристик РОВ**

Отфильтрованный экстракт отбирался автоматической лабораторной пипеткой (Thermo Scientific до 10 мл) объемом 1 мл и разбавлялся 2 мл деионизированной воды в стеклянной

пробирке [Freeman C. et al., 2004]. Подготовленный образец помещался в рабочую кварцевую кювету с толщиной пропускания 1 см, а аналогичная кювета сравнения заполнялась деионизированной водой [Rakhova, 2023]. Измерения проводились на приборе UV/Visible Spectrophotometer T8DCS (PERSEE, Китай) при длинах волн: 250, 254, 365, 400 и 600 нм [Peuravuori, Pihlaja, 1997; Uyguner, Bekbolet, 2005; Olefeldt, Roulet, 2012]. В программе UV-Win строилась базовая линия по отношению к деионизированной воде, определяющая нулевое светопоглощение. Значения показателей образцов воды были получены как отклонение значений от базовой линии. В качестве выходного сигнала был использован показатель оптической плотности.

Для изучения показателя  $SUVA_{254}$  используется соотношение между поглощением при 254 нм к содержанию РОУ. Показатель увеличивается прямо пропорционально доле ароматической части в составе органического соединения [Weishaar et al., 2003]. Коэффициент соотношения гумусовых веществ (ГВ) в РОВ определялся как соотношение значений поглощения при длинах волн 400 и 600 нм ( $E_4 : E_6$ ). Состав гумусовых веществ принципиально разделяется на две фракции: фульвокислоты и гуминовые кислоты. Коэффициент среднего молекулярного веса (МВ) РОВ определялся по соотношению значений длин светопоглощения между 250 и 365 нм ( $E_2 : E_3$ ). Данный показатель имеет прямую зависимость от показателя содержания ГВ [Thurman, 1985; Lou, Xie, 2006; Olefeldt, Roulet, 2012]. Всего было проанализировано 97 водных экстрактов.

### Определение значений рН

Показатель рН торфа измерялся потенциометрическим методом (HANNA Instruments, Edge, США) в суспензии образца торфа. К высушенной в количестве 1 г навеске торфяного образца (в случае минерального образца навеска составляла 10 г) добавляли 25 мл дистиллированной воды. Полученная смесь взбалтывалась в шейкере в течение 1 часа и после отстаивалась в течение 1 часа. Измерения проводили при температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Электроды погружались в верхнюю часть суспензии. Показания рН-метра фиксировались после стабилизации. Всего было проанализировано 97 водных экстрактов.

### Визуализация данных

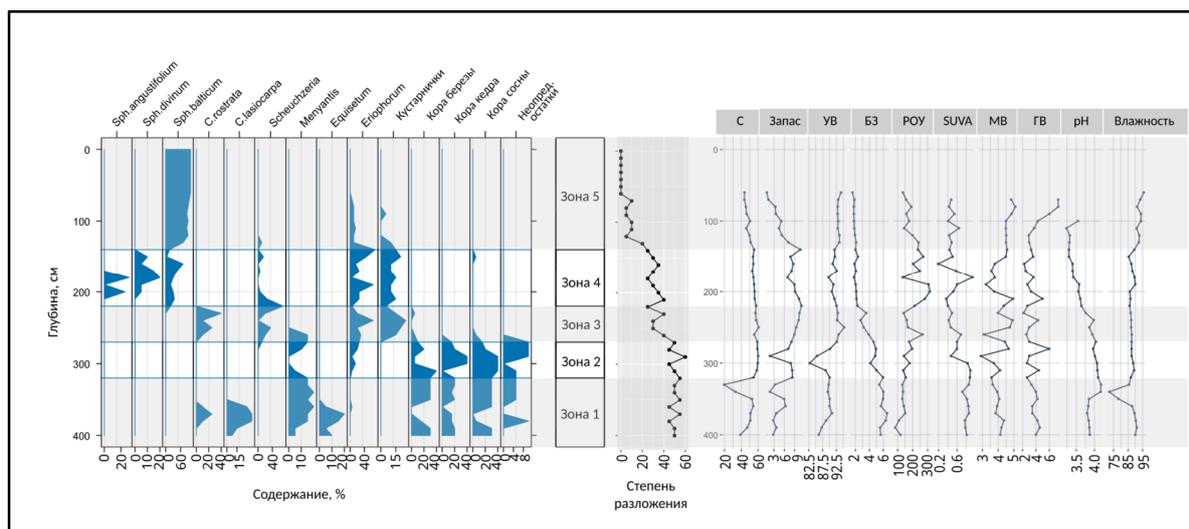
Обработка и визуализация данных была проведена на языке программирования R [R Core Team, 2020] с применением пакета 'ggplot2' [Wickham, 2016] для визуализации данных, 'analogue' [Simpson, Oksanen, 2020] и 'rioja' [Juggins, 2017] для построения стратиграфического профиля торфяной залежи. Стратиграфические зоны торфяных кернов были выделены с применением кластерного анализа [Grimm, 1987] и модели 'broken-stick' [Bennett, 1996]. Для определения уровня корреляции между переменными был использован тест Спирмана с уровнем значимости  $p < 0.01$ . Корреляция считалась значимой при значении коэффициента Спирмана больше  $r > 0.7$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе полученных данных были составлены графики и выявлены зависимости показателей между собой (Рис. 1-3).

Для первого керна было определено 5 зон (Рис. 1): зона 1 характеризовалась эвтрофной стадией с древесно-травяным типом торфа, где доминирующими видами являлись вахта, осоки (*C. lasiocarpa* и *C. rostrata*), хвощ, а также остатки древесных пород, представленных сосной, кедром и березой. В зоне 2 наблюдалась смена стадии – от эвтрофной к мезотрофной: в ботаническом составе преобладали древесные виды, преимущественно сосна, кедр и береза. В зоне 3 фиксировалась смена растительных сообществ: доминирующую роль приобретали кустарнички, осока (*C. rostrata*), пушица и шейхцерия. В зоне 4 наблюдался переход к олиготрофной стадии, характеризующийся снижением доли осоковых и появлением сфагнового торфа, включающего в состав *Sph. balticum*, *Sph. angustifolium* и *Sph. divinum*. Зона

5 характеризовалась резким переходом растительного покрова к современному состоянию – мочажинному сообществу с преобладанием *Sph. balticum*.



**Рис. 1.** Ботанический состав и физико-химические показатели торфяного керна «Cond-1» ( $C_{\text{орг}}$  – органический углерод (%), Запас – запас углерода ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ); УВ – увлажнение (степень увлажнения); БЗ – активное богатство и засоление почв (степень богатства); РОУ – растворенный органический углерод ( $\text{мг}/\text{л}$ ); SUVA – показатель ароматичности; МВ – коэффициент среднего молекулярного веса; ГВ – коэффициент соотношения гумусовых веществ; рН – водородный показатель; Влажность (%), Степень разложения (%).

**Fig. 1.** Macrofossil and physicochemical parameters of the peat core "Cond-1"

( $C_{\text{орг}}$  – organic carbon (%), Запас – carbon reserve ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); УВ – moisture (moisture level); БЗ – active soil richness and salinization (richness level); РОУ – dissolved organic carbon ( $\text{mg}/\text{l}$ ); SUVA – aromaticity index; МВ – average molecular weight coefficient; ГВ – humic substances ratio coefficient; рН – hydrogen index; Влажность (%) – humidity (%), Степень разложения (%) – decomposition degree (%).

Степень разложения торфа имела неизменно низкие значения для поверхности, до глубины 120 см не превышала 10%, а затем увеличивалась по всей глубине, достигая пика в 60% на 290 см, и снижалась до 45-50% до минерального ложа.

В нижнем слое стратиграфического профиля были обнаружены остатки хвоща. Выше по разрезу, на глубине 300-220 см, присутствовала примесь шейхцерии и вахты, отмечалось постепенное нарастание содержания коры и древесины сосны, ели и берёзы. С 300 до 60 см возрастало содержание пушицы, при этом на глубине 150-130 см была обнаружена прослойка вересковых кустарничков. С глубины 220-180 отмечалось увеличение доли сфагновых мхов – *Sph. angustifolium* и *Sph. divinum*. На глубине 170-60 см в ботаническом составе доминировали *Sph. balticum*.

Статистические характеристики физико-химических показателей торфа для керна «Cond-1» представлены в таблице 1.

Содержание органического углерода в торфе изменялось от 19.4% до 60.7%, при этом минимальное значение было обнаружено на глубине 320-330 см. Ниже по горизонту происходило увеличение содержания углерода, и к придонному слою концентрация составляла 38.9%. Максимальное значение (60.7%) наблюдалось в середине торфяной колонки (240-250 см). Среднее значение по всей глубине составило  $51.5 \pm 8.4\%$ .

Запас органического углерода в десятисантиметровом сегменте керна возрастал ближе к середине. Минимальный запас С был обнаружен на глубине 60 см –  $0.9 \text{ кг}/\text{м}^2$ ; максимальный запас – на глубине 210-220 см и составлял  $11 \text{ кг}/\text{м}^2$ ; среднее значение в десятисантиметровом сегменте составило  $6.4 \pm 3 \text{ кг}/\text{м}^2$ , а общий запас содержания углерода по всей глубине (до 400 см) составил  $225 \text{ кг}/\text{м}^2$ .

**Таблица 1.** Статистические характеристики по торфяному керну «Cond-1»: минимальное (Min), максимальное (Max), среднее значения (X) и стандартное отклонение (STD).

**Table 1.** Statistical characteristics of the peat core “Cond-1”: minimum (Min), maximum (Max), average (X) and standard deviation (STD).

| Показатель                              | Min  | Max   | X    | STD  |
|---|------|-------|------|------|
| Концентрация органического углерода (%) | 19.4 | 60.7  | 51.5 | 8.4  |
| Запас углерода (кг/м <sup>2</sup> )     | 0.9  | 11    | 6.4  | 3    |
| УВ (ст.)                                | 82.8 | 95.4  | 91.1 | 2.7  |
| БЗ (ст.)                                | 1.6  | 6.5   | 3.5  | 1.7  |
| РОУ (мг/л)                              | 84.5 | 314.7 | 181  | 57.8 |
| SUVA <sub>254</sub>                     | 0.2  | 0.9   | 0.6  | 0.2  |
| МВ                                      | 2.9  | 5.1   | 4.2  | 0.5  |
| ГВ                                      | 2.2  | 7.3   | 3.8  | 1.3  |
| pH                                      | 3.2  | 4.2   | 3.7  | 0.3  |

Для показателя УВ характерно неравномерное распределение значений по глубине – максимальное увлажнение наблюдалось на 240-250 см – 95.4 ступени (ст.), что характерно для болотной среды обитания. Минимальное значение 82.8 ст. (сыро-луговая среда обитания) было обнаружено на глубине 290-300 см. Среднее значение показателя УВ по всей торфяной колонке составило  $91.1 \pm 2.7$  ст.

Показатель БЗ имел тенденцию повышения значений к придонному слою. Минимальное значение 1.6 ст. (олиготрофная среда обитания) было обнаружено на глубине 50-60 см, максимальное значение в 6.5 ст. (мезотрофная среда обитания) наблюдалось на 360-370 см. Среднее значение показателя для всего керна составило  $3.5 \pm 1.7$  ст.

Содержание РОУ волнообразно изменялось по всему торфяному керну. Наибольшая амплитуда значений была обнаружена в пределах глубин 100-200 см. Максимальные значения обнаружены на глубине 190-200 см и составляли 315 мг/л. Минимальные значения наблюдались в поверхностных и придонных слоях (на глубине 60-120 см и 300-400 см), где концентрация изменялась в пределах  $110 \div 200$  мг/л.

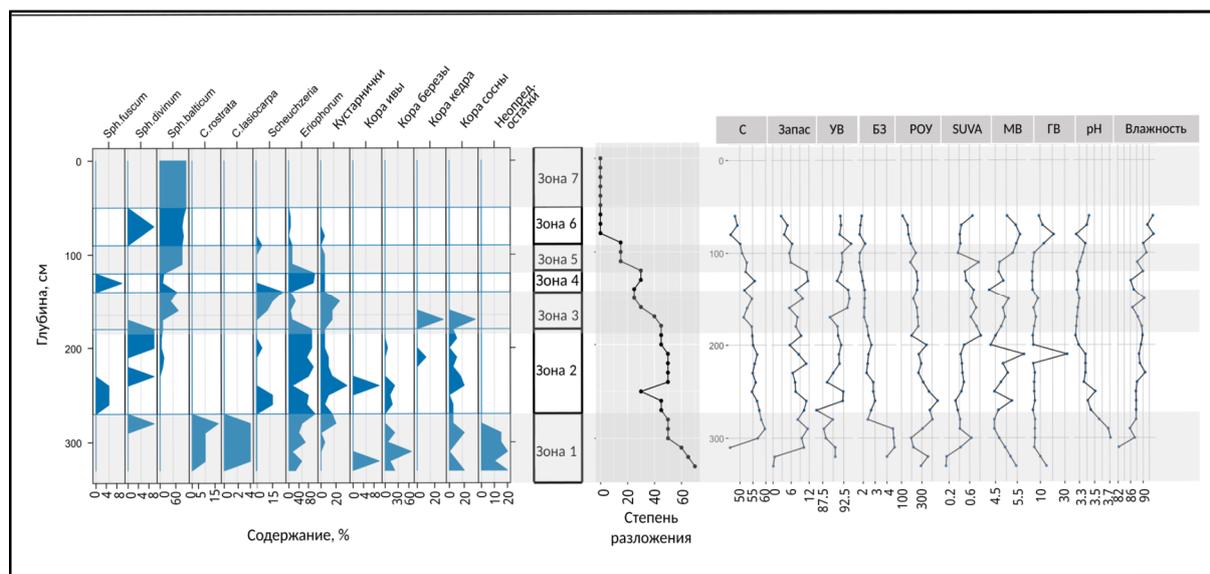
Показатель SUVA<sub>254</sub> с глубиной увеличивался, где максимальный пик (0.9) зафиксирован на глубинах 160-180 см. Минимальное значение 0.2 наблюдалось на глубине 150-160 см. На глубинах 280-400 см было отмечено повышение значений показателя с 0.5 до  $0.8 \pm 0.1$ .

Распределение значений МВ органических соединений имело резкие скачки от минимальных до максимальных значений ( $2.9 \div 4.9$ ) на глубинах 200-300 см. Средние значения МВ на всей глубине торфяной залежи составили  $4.2 \pm 0.5$ .

Значения ГВ в торфах были распределены неравномерно. Максимальные значения обнаружены на глубинах 270-340 см и изменялись в диапазоне  $3.9 \div 4.2$ , а минимальные значения ( $3.2 \div 3.8$ ) характерны для глубин 100-230 см.

Показатели pH и влажности имели взаимно обратную тенденцию: значение pH с глубиной увеличивалось, достигая максимального значения 4.2 на глубине 340 см и снижаясь до минимальных значений 3.8 в придонном слое; при этом значение влажности имело тенденцию к уменьшению с 95% на поверхности до 90% в придонном слое с пиковым снижением до 70% на 340 см.

Для второго керна было выделено 7 зон (Рис. 2): зона 1 характеризовалась эвтрофной стадией с древесно-травяным типом торфа, в котором преобладали осоки (*C. lasiocarpa* и *C. rostrata*), пушица, а также остатки древесных растений – ива, береза и сосна. В зоне 2 наблюдался переход к мезоолиготрофной стадии – в ботаническом составе осоки сменились на пушицу и кустарнички с примесью сфагновых мхов (*Sph. divinum* и *Sph. balticum*). Зона 3 характеризовалась переходом к олиготрофному типу питания и снижению доли пушицы, увеличению доли кустарничков и древесной растительности с заменой *Sph. divinum* на *Sph. balticum*. В зоне 4 были обнаружены пики пушицы и сфагнового мха (*Sph. fuscum*). Зоны 5 и 7 характеризовались преобладанием *Sph. balticum* в составе растительности с примесью *Sph. divinum* в зоне 6.



**Рис. 2.** Ботанический состав и физико-химические показатели торфяного керна «Cond-2» ( $C_{\text{орг}}$  – органический углерод (%), Запас – запас углерода ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ); УВ – увлажнение (степень увлажнения); БЗ – активное богатство и засоление почв (степень богатства); РОУ – растворенный органический углерод ( $\text{мг}/\text{л}$ ); SUVA – показатель ароматичности; MB – коэффициент среднего молекулярного веса; ГВ – коэффициент соотношения гумусовых веществ; pH – водородный показатель; Влажность (%), Степень разложения (%).

**Fig. 2.** Macrofossil and physicochemical parameters of the peat core "Cond-2" ( $C_{\text{орг}}$  – organic carbon (%), Запас – carbon reserve ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); УВ – moisture (moisture level); БЗ – active soil richness and salinization (richness level); РОУ – dissolved organic carbon ( $\text{mg}/\text{l}$ ); SUVA – aromaticity index; MB – average molecular weight coefficient; ГВ – humic substances ratio coefficient; pH – hydrogen index; Влажность (%) – humidity (%), Степень разложения (%) – decomposition degree (%).

Степень разложения имела низкие значения для верхних 110 см, достигая 15%. С глубиной наблюдалось повышение до уровня в 30% на глубине 250 см. Максимальное значение зафиксировано в придонном слое – 70%.

Для торфяного керна «Cond-2» на глубине 320 см была обнаружена минеральная примесь. С глубины 320 см до 280 см в составе торфа увеличивалась доля осок (*C. rostrata* и *C. lasiocarpa*). Доля коры и древесины сосны доминировала в промежутке с 330 до 170 см, при этом остатки березы и ивы появлялись на глубине 330 см и пропадали на 240 см. Единично наблюдалась шейхцерия на глубинах 260-250 см, 200 см, 160-140 см и 90 см. С 200 см до 60 см шло преобладание *Sph. balticum* с небольшой примесью *Sph. divinum* на глубинах 290 см, 240 см, 200-180 см и 80-60 см и единичная встречаемость *Sph. fuscum* на 280 и 130 см. С глубины 330 см до глубины 60 см увеличивалось содержание пушицы и кустарничков.

Статистические характеристики физико-химических показателей торфа для керна «Cond-2» представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Статистические характеристики по торфяному керну «Cond-2»: минимальное (Min), максимальное (Max), среднее значения (X) и стандартное отклонение (STD).

**Table 2.** Statistical characteristics of the peat core “Cond-2”: minimum (Min), maximum (Max), average (X) and standard deviation (STD).

| Показатель                              | Min   | Max   | X     | STD  |
|---|-------|-------|-------|------|
| Концентрация органического углерода (%) | 0.6   | 59.7  | 46.6  | 18.3 |
| Запас углерода (кг/м <sup>2</sup> )     | 0.04  | 11.7  | 7     | 3.6  |
| УВ (ст.)                                | 86    | 94.3  | 91.1  | 1.9  |
| БЗ (ст.)                                | 1.7   | 4.6   | 2.6   | 0.9  |
| РОУ (мг/л)                              | 114.3 | 454.3 | 265.9 | 76.1 |
| SUVA <sub>254</sub>                     | 0.1   | 0.8   | 0.5   | 0.2  |
| МВ                                      | 4.2   | 5.8   | 4.9   | 0.4  |
| ГВ                                      | 3.6   | 32    | 8     | 6.2  |
| pH                                      | 3.3   | 3.7   | 3.4   | 0.1  |

Концентрация органического углерода в торфе увеличивалась с глубиной, принимая минимальные значения (46.4%) на границе с минеральным слоем на глубине 300-310 см, а максимальные значения 59.7% – на глубине 290 см. Среднее значение концентрации составило  $46.6 \pm 10.2\%$ .

Кривая запаса органического углерода по глубине имела волнообразную форму. Зафиксировано увеличение показателя с глубины 60 см до 310 см, после чего значение уменьшалось. Минимальное значение (0.04 кг/м<sup>2</sup>) наблюдалось в придонном слое на глубине 330 см. Наибольшее значение наблюдалось на глубинах 120-150 см с показателем 11.7 кг/м<sup>2</sup>. Среднее значение в десятисантиметровом сегменте составило  $7.0 \pm 2.8$  кг/м<sup>2</sup>. Запас органического углерода по всей глубине керна (до 330 см) составил 209 кг/м<sup>2</sup>.

УВ характеризовался высоким значением в верхних слоях – на глубине 90 см составил 94.3 ст. (болотная среда обитания); минимальное значение (86 ст.) обнаружено на глубине 270 см (сыро-луговая среда обитания). Среднее значение показателя УВ по всей глубине составило  $91.1 \pm 1.9$  ст.

Для БЗ было характерно увеличение значений с глубиной залегания торфяной залежи. Минимальные показатели наблюдались для поверхностных слоев 60-170 см с минимумом в 1.7 ст. (олиготрофная среда обитания) на глубине 110 см. Максимальные значения 4.6 ст. (мезоолиготрофная среда обитания) были обнаружены на глубинах 290-310 см. Среднее значение для всего керна составило  $2.6 \pm 1.9$  ст.

Содержание РОУ увеличивалось с глубиной залегания торфа. Максимальные значения концентраций (266÷454 мг/л) были обнаружены на глубинах 200-320 см. Минимальные значения концентрации наблюдались в поверхностных слоях торфяной залежи на глубине 60-100 см и составили 114÷243 мг/л.

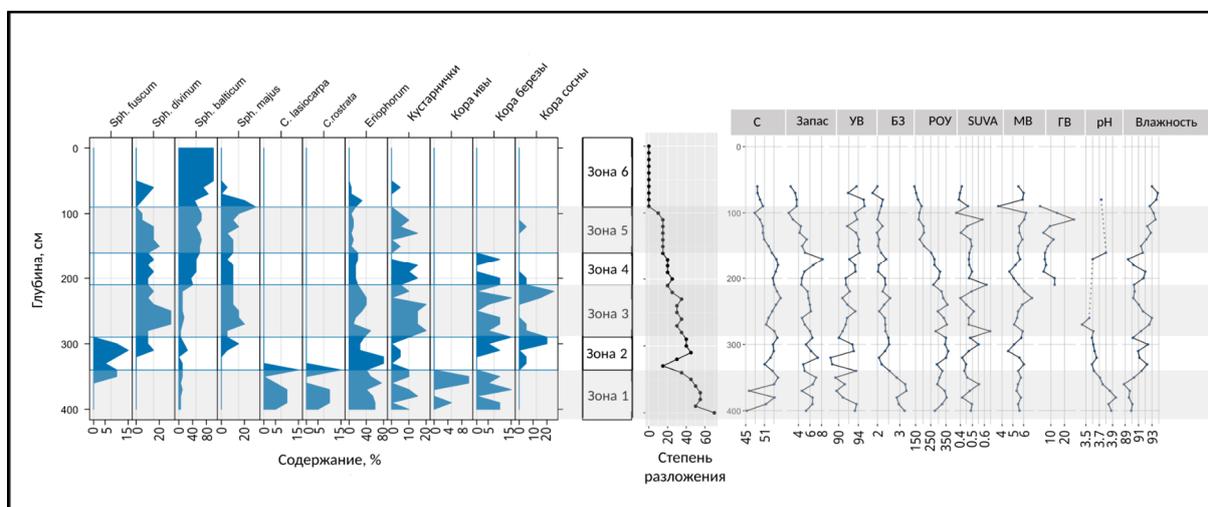
Показатель SUVA<sub>254</sub> имел максимальные значения  $0.38 \div 0.82$  на глубинах 100-200 см. Снижение значений приходилось на глубины 210-350 см, и минимальные значения  $0.2 \pm 0.1$  были обнаружены на глубинах 320-330 см.

Значения МВ органических соединений имели максимальный пик 5.81 на глубине 210 см, а минимальные значения  $4.2 \pm 0.3$  – на глубинах 140 и 200 см. Средние значения МВ по всей глубине торфяной залежи составили  $5.0 \pm 0.4$ .

Значения ГВ в торфе распределялись относительно равномерно с глубиной. Максимальный пик 32.0 наблюдался на глубине 210 см, а минимальные значения составили 3.6÷4.0.

Значение рН увеличивалось с глубиной с минимальных значений 3.25-3.40 у поверхности до максимальных значений 3.5±0.2 на глубинах 250-300 см. Показатель влажности имел тенденцию на снижение с глубиной залегания с 93% до 82%, принимая максимальные значения 91-92% на глубинах 60-100 см, а минимальные 82% – на глубине 310 см.

Для третьего керна выделено 6 зон (Рис. 3). В зоне 1 преобладала древесно-травяная группа торфа, характеризующаяся значительным содержанием пушицы, осок (*C. lasiocarpa* и *C. rostrata*), кустарничков, а также остатков древесных растений, представленных ивой и березой. В зоне 2 происходила смена стадий – эвтрофная сменилась на мезоолиготрофную, к перечисленным растительным остаткам добавились *Sph. fuscum* и остатки сосны. Зоны 3 и 4 отличались наличием древесно-травяной группы торфа (пушица, кустарнички, береза и сосна) с преобладанием в составе сфагновых остатков, включающих *Sph. balticum*, *Sph. majus* и *Sph. divinum*. В зонах 5 и 6 наблюдалось незначительное снижение доли пушицы и кустарничков при одновременном увеличении сфагновых мхов.



**Рис. 3.** Ботанический состав и физико-химические показатели торфяного керна «Cond-3» (C<sub>орг</sub> – органический углерод (%), Запас – запас углерода (кг/м<sup>2</sup>); УВ – увлажнение (степень увлажнения); БЗ – активное богатство и засоление почв (степень богатства); РОУ – растворенный органический углерод (мг/л); SUVA – показатель ароматичности; MB – коэффициент среднего молекулярного веса; ГВ – коэффициент соотношения гумусовых веществ; pH – водородный показатель; Влажность (%), Степень разложения (%).

**Fig. 3.** Macrofossil and physicochemical parameters of the peat core "Cond-3" (C<sub>орг</sub> – organic carbon (%), Запас – carbon reserve (kg/m<sup>2</sup>); УВ – moisture (moisture level); БЗ – active soil richness and salinization (richness level); РОУ – dissolved organic carbon (mg/l); SUVA – aromaticity index; MB – average molecular weight coefficient; ГВ – humic substances ratio coefficient; pH – hydrogen index; Влажность (%) – humidity (%), Степень разложения (%) – decomposition degree (%).

Степень разложения не превышала 15% до глубины 160 см с максимальным значением 80% в минеральном слое.

На третьей точке минеральный слой начинался с глубины 400 см. На глубине 350 см увеличивалась доля коры и древесины ивы с примесью пушицы, осоки (*C. lasiocarpa*, *C. rostrata*) и *Sph. fuscum*. На глубинах 290-140 см присутствовали вересковые кустарнички, а на глубине 200 см в ботаническом составе появились кора и древесина березы и сосны. В диапазоне глубин 220-60 см в ботаническом составе преобладали *Sph. balticum* с примесью *Sph. majus*, *Sph. divinum*, кустарничками и пушицей.

Статистические характеристики физико-химических показателей торфа для керна «Cond-3» представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Статистические характеристики по торфяному керну «Cond-3»: минимальное (Min), максимальное (Max), среднее значения (X) и стандартное отклонение (STD).

**Table 3.** Statistical characteristics of the peat core “Cond-3”: minimum (Min), maximum (Max), average (X) and standard deviation (STD).

| Показатель                              | Min   | Max   | X     | STD  |
|---|-------|-------|-------|------|
| Концентрация органического углерода (%) | 45.3  | 56.2  | 52.3  | 2.7  |
| Запас углерода (кг/м <sup>2</sup> )     | 2.3   | 8.2   | 5.2   | 1.3  |
| УВ (ст.)                                | 88.4  | 95.2  | 92.2  | 1.7  |
| БЗ (ст.)                                | 1.8   | 3.3   | 2.4   | 0.4  |
| РОУ (мг/л)                              | 142.7 | 365.6 | 276.9 | 69.9 |
| SUVA <sub>254</sub>                     | 0.4   | 0.6   | 0.5   | 0.1  |
| МВ                                      | 3.6   | 6.8   | 5.5   | 0.5  |
| ГВ                                      | 2.1   | 27    | 9.6   | 6.5  |
| pH                                      | 3.4   | 4     | 3.7   | 0.1  |

Минимальные значения содержания органического углерода составили 45.3% на глубине 400 см; максимальные значения 56.2% были обнаружены на глубине 230 см. Среднее значение содержания органического углерода по глубине составило 52.3±2.7%.

Максимальный запас углерода (8.2 кг/м<sup>2</sup>) установлен на глубине 170 см. Минимальное значение (2.3 кг/м<sup>2</sup>) наблюдалось на глубине 100 см. Среднее значение запаса углерода в десятисантиметровом сегменте керна составило 5.2±1.3 кг/м<sup>2</sup>. Общий запас углерода по всему торфяному керну составил 182 кг/м<sup>2</sup>.

Значение УВ уменьшалось с глубиной. Среднее значение УВ составило 92.2±1.7 ст.; минимальное значение (88.3 ст.) наблюдалось на глубине 320 см (сыро-луговая среда обитания). Максимальное значение 95.2 ст. (болотная среда обитания) обнаружено на глубине 90 см.

Увеличение БЗ происходило с глубиной залегания торфяного керна. Среднее значение для всего керна составило 2.3±0.4 ст. Минимальное значение 1.7 ст. (олиготрофная среда обитания) наблюдалось на глубине 70 см; максимальное значение 3.2 ст. (олиготрофная среда обитания) – на глубине 370 см.

Максимальные концентрации РОУ были зафиксированы в пределах 190-390 см с пиком в 365.6 мг/л на глубине 310 см. Низкие концентрации характерны для верхних 180 см, где значения изменялись в пределах 142.8÷274.8 мг/л.

Показатель SUVA<sub>254</sub> имел максимальные значения в диапазоне 0.6÷0.7 с пиком на глубине 280 см. Каждые 100 см отмечались скачки значений. Минимальное значение 0.4 находилось на глубине 220-230 см.

Значения МВ увеличивались в диапазоне 4.68÷6.8 на глубинах 200-270 см с максимальным пиком на 230 см и минимальным значением на глубине 90 см. Среднее значение коэффициента по всей глубине торфяной залежи составило 5.6±0.5.

Значения ГВ на глубине 110 см имели высокое значение 27.0; увеличение показателя до 12.0÷12.8 было обнаружено на глубинах 140 см и 200-210 см соответственно. С глубины 210 см и до минерального дна значения коэффициента выходили за пределы обнаружения.

Значение показателя рН уменьшалось от 3.73 на поверхности до 3.44 на глубине 270 см с последующим ростом до 3.95 у минерального дна.

Максимальное значение показателя влажности торфа 93.8% было обнаружено на глубине 70 см с последующим снижением до минимального значения (88.8%) на глубине 360 см.

## ДИСКУССИЯ

На особенности физико-химических свойств торфяных почв верхового болота «Кондинских озер» существенное влияние оказывает ботанический состав торфа. Эвтрофная стадия в развитии болотного массива характеризуется обилием остатков осок (*C. lasiocarpa* и *C. rostrata*), вахты и древесины (кора и древесина сосны, ели, березы и ивы). На исследуемом участке данный тип торфа формирует древесно-травяной слой мощностью до 1 метра. Эвтрофный горизонт на всех изученных участках входит в одну стратиграфическую зону. Мезотрофная стадия также занимает около 1 метра и подразделена на две стратиграфические зоны в Cond-1, а в Cond-2-3 – на одну стратиграфическую зону. Эти стадии сменяются олиготрофной стадией, для которой характерно преобладание сфагновых мхов, формирующих комплексный торф (*Sph. balticum*, *Sph. majus*, *Sph. divinum* и *Sph. fuscum*). Определена высокая положительная корреляция содержания вахты с неопределенными травяными остатками ( $r = 0.61$ ,  $p < 0.01$ ).

По всем кернам сфагновые мхи в верхнем слое характеризуются меньшей степенью разложения, что отражается на свойствах органического вещества: в верхних слоях концентрация органического углерода и его содержание (в слое 10 см) имели средние значения 47.9% и 3.6 кг/м<sup>2</sup>. Постепенное повышение значений содержания органического углерода 55.1% и его запаса (в слое 10 см) 7.5 кг/м<sup>2</sup> наблюдалось к середине торфяной залежи (с 160 до 310 см). Увеличение концентрации органического углерода напрямую связано с повышением степени разложения, а также с содержанием пушицы и кустарничков в составе торфа. Наличие в придонном слое минеральной примеси отображается в малом содержании органического углерода – 38.8%; запас органического углерода в слое 10 см составил 3.8 кг/м<sup>2</sup>. Среднее значение концентрации по глубине всех трех кернов составило 50±9.8%, запас органического углерода в слое 10 см составил 5 кг/м<sup>2</sup>.

Таким образом, торфы территории природного парка отличаются большими запасами органического углерода по сравнению с торфами верхового болота территории Мухрино, на что непосредственное влияние оказывает состав торфа. Так, наиболее распространенным видом торфа для территории парка «Кондинские озера» является древесно-травяная группа (около 60% от всех исследованных образцов). Для аналогичной подзоны тайги на верховом болоте Мухрино наиболее преобладающей группой торфа является сфагновый (22.5% от всех исследованных образцов) [Zarov et al., 2023].

Показатели УВ и БЗ имеют обратно пропорциональную зависимость. От верхнего горизонта до средних глубин торфяной залежи идет увеличение УВ до 91.9 ст. с дальнейшим уменьшением значения до 89 ст. Показатель БЗ увеличивается с глубиной до 4.4 ст. при среднем значении в 2.8 ст., что связано с изменением трофности растений-торфообразователей и доступностью минерального питания на дне. Определена высокая положительная корреляция между SUVA<sub>254</sub> и БЗ (коэффициент корреляции 0.5,  $p < 0.01$ ).

Для исследуемого участка на территории парка «Кондинские озера» концентрация РОУ увеличивается с глубиной, похожая тенденция прослеживается для верхового болота Мухрино [Shanyova, 2023]. Количественный состав РОУ зависит от содержания органического вещества в торфе и от степени разложения торфа [Kalbitz et al., 2002]. Основными факторами, которые определяют концентрацию РОУ, являются ботанический состав и тип торфа [Dalva M. et al., 1991]. Высокие концентрации РОУ совпадали с понижением показателя УВ и увеличением содержания пушицы, кустарничков и шейхцерии в стратиграфическом профиле. Снижение концентраций РОУ происходит с преобладанием остатков *Sph. balticum*, *Sph. divinum* в торфе. Среднее содержание РОУ для исследуемой торфяной залежи имеет значения в пределах 241.27 мг/л. Выявлена корреляция между содержанием пушицы и РОУ с коэффициентом  $r = 0.6$ ,  $p < 0.01$ .

Взаимосвязь между концентрациями РОУ в речных водах и запасами органического углерода в почве была исследована в различных пространственных масштабах системы реки Ди (Шотландия). В данном исследовании рассматривается возможность прогнозирования потока РОУ при условии наличия детализированных данных о почве [Aitkenhead et al., 1999]. Определено, что не только биологические процессы контролируют концентрацию РОУ, но и значения рН имеют значительное влияние на скорость высвобождения РОУ из торфа по причине влияния на сорбцию и растворимость органического углерода. Например, в болотах Великобритании низкие концентрации РОУ взаимосвязаны с подкислением торфяных вод до значения рН 3.5÷4.1 [Clark et al., 2005].

По всем торфяным кернам значения рН увеличивались с глубиной залегания торфяной залежи. Увеличение значения рН предположительно связано с преобладанием кустарничков и древесных остатков в составе торфа. Определена корреляция рН с содержанием сосны (коэффициент  $r = 0.6$ ,  $p < 0.01$ ) и вахты (коэффициент  $r = 0.6$ ,  $p < 0.01$ ). В данном исследовании показана прямая зависимость между рН и степенью разложения торфяной залежи. На значение показателя рН влияет смешивание дождевой воды с торфяными водами. Это приводит к нарушению баланса растворимости органического углерода и, как следствие, к увеличению или уменьшению содержания РОУ в воде [Scott et al., 1998].

На болотах Швеции различия в химическом составе и оптических свойствах торфов определяет преобладание осок – концентрация РОУ и показатель  $SUVA_{254}$  становятся ниже, чем на болотах с преобладанием сфагнового мха [Olefeldt, Roulet, 2012]. В исследовании на Скандинавских островах в водно-болотных угодьях уровень  $SUVA_{254}$  увеличивался менее чем на 1 единицу за 3 метра. На глубине от 50-90 см  $SUVA_{254}$  составлял 2.5, а затем увеличивался до 4.5 у поверхности, на глубине 6-12 см. При этом содержание РОУ и показатель  $SUVA_{254}$  зависят от ботанического состава, в частности, наличие древесных остатков снижает концентрацию РОУ и имеет стабильное значение для показателя  $SUVA_{254}$  (~3.7) [Agren et al., 2008].

Полученные нами данные по показателю  $SUVA_{254}$  оказались ниже в 4 раза и имели тенденцию на увеличение к середине торфяной залежи, при этом на аналогичном верховом болоте Мухрино показатель  $SUVA_{254}$  у поверхностных вод оказался значительно выше, изменяясь в пределах 2.0÷3.8 [Rakhova, 2024]. Обнаружено резкое снижение показателей  $SUVA_{254}$  и РОУ с преобладанием в торфяной залежи *Sph. fuscum* и *Sph. balticum*. Придонные слои торфа имеют наименьшие значения  $SUVA_{254}$  в связи с присутствием минеральной примеси. Кривая распределения показателя  $SUVA_{254}$  по глубине характеризуется наличием пикового значения через каждые ~100 см. Определена высокая положительная корреляция  $SUVA_{254}$  с содержанием вахты (показатель  $r = 0.6$ ,  $p < 0.01$ ).

Соотношение различных фракций гуминовых веществ в торфяной залежи «Кондинских озер» распределено неравномерно, что связано с количеством органических веществ: лигнины, углеводы, липиды, полисахариды, а также содержание карбоксильных и фенольных оксигрупп [Thurman, 1985; Bolin et al., 1979]. Низкое значение показателя отражает высокую молекулярную массу гуминовых веществ в РОВ и степень гумификации [Traversa et al., 2014]. Гуминовые кислоты состоят из высокогумифицированных органических соединений, которые устойчивы к разложению и, следовательно, имеют тенденцию к накоплению [Machado et al., 2020].

Исследование, выполненное на северо-востоке Германии, подчеркивает значимую роль микроорганизмов в разложении и гумификации растительных остатков. Таким образом, возрастающая степень гумификации органического вещества связана с возрастающей микробной трансформацией водорастворимых органических веществ углерода [Kalbitz et al., 2002]. В нашем исследовании средний молекулярный вес имеет средние значения по глубине 4.2÷5.6, что, вероятно, взаимосвязано с содержанием *Sph. balticum* и *Sph. majus*. Выявлена корреляция среднего молекулярного веса с гуминовыми веществами (коэффициент  $r = 0.7$ ,  $p < 0.01$ ).

Таким образом, обнаруженная динамика изучаемых показателей обусловлена специфическими условиями исследуемой территории, что требует проведения ряда дополнительных исследований.

## ВЫВОДЫ

В данной работе были описаны три стратиграфических профиля, определен показатель УВ, значение БЗ, распределение концентрации РОУ, определены спектральные характеристики РОУ и содержание органического углерода в торфе на ненарушенных участках олиготрофного болота территории парка «Кондинские озера». Первая стадия развития болота характеризовалась преобладанием эвтрофной растительности, отлагающей древесно-травяной (шейхцерия, вахта и осоки) вид торфа, с долей гипновых мхов, встречающихся нерегулярно в озерах и местах выхода грунтовых вод. Обеднение питающих вод способствует переходу болот к мезотрофному этапу со сменой древесно-травяных видов торфа на травяные (пушица). Переход в олиготрофную стадию обусловлен минеральным питанием лишь за счёт атмосферных осадков с малым содержанием минеральных веществ, что приводит к развитию сфагновых видов мхов, отлагающих одноименный вид торфа. В целом болото на территории природного парка «Кондинские озера» характеризуется как равномерно развивающееся и захватывающее все стадии формирования болот.

На основе выполненного исследования установлено, что содержание органического углерода и РОУ в торфах не всегда увеличивается с глубиной залегания. Различия в характере РОУ между торфяными колонками были обусловлены ботаническим составом торфа. Установлено, что для показателя  $SUVA_{254}$  характерна прямая зависимость от содержания древесных остатков и кустарничков в торфе. Также высокие концентрации РОУ совпадают с понижением показателя УВ и увеличением содержания пушицы, кустарничков и шейхцерии в стратиграфическом профиле.

Отмечается корреляция соотношения гуминовых веществ и среднего молекулярного веса. Значимыми факторами являются состав ГВ – более сложные структуры могут характеризоваться более высоким средним молекулярным весом и устойчивостью фракции – гуминовые вещества, образующиеся в процессе разложения органических материалов, которые менее подвержены деструкции и фотодegradации.

Проанализировав результаты трех торфяных кернов, было определено, что изменения в показателях зависят не только от глубины залегания торфа, но и от совокупности физико-химических характеристик. Наше исследование определяет важность проведения комплексной оценки для выявления особенностей распределения РОУ и органического углерода по стратиграфическому профилю.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта «Наука».

Выражаем искреннюю благодарность за помощь в проведении исследований доктору биологических наук Елене Лапшиной и старшему научному сотруднику Евгению Зарову, а также лаборантам Артему Кулику и Леониду Литвинову.

## ЛИТЕРАТУРА

- Agren A., Buffam I., Berggren M., Bishop K., Jansson M., Laudon H. 2008. Dissolved organic carbon characteristics in boreal streams in a forest-wetland gradient during the transition between winter and summer. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G3). DOI: 10.1029/2007JG000674
- Aitkenhead J., Hope D., Billett M. 1999. The relationship between dissolved organic carbon in stream water and soil organic carbon pools at different spatial scales. *Hydrological Processes*, 13(8): 1289–1302. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19990615)13:8<1289: AID-HYP766>3.0.CO; 2-M
- Armstrong A., Holden J., Luxton K., Quinton J. 2012. Multi-scale relationship between peatland vegetation type and dissolved organic carbon concentration. *Ecological Engineering*. 47: 182–188. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.06.027.

- Bai H., Jiang Z., He M., Ye B., Wei S. 2018. Relating Cd<sup>2+</sup> binding by humic acids to molecular weight: A modeling and spectroscopic study. *Journal of Environmental Sciences*, 70: 154–165. DOI: 10.1016/j.jes.2017.11.028.
- Batrshina V., Zarov E. 2023. Comparison of carbon stocks in the territories of Mukhrino station and Kondinsk lakes natural park. *Conference: Youth science of the north*, Yugra State University, Khanty-Mansiysk (in Russia). [Батршина В. Р., Заров Е. А. 2023. Сравнение запасов углерода на территориях стационара «Мухрино» и природного парка «Кондинские озера». Югорский государственный университет конференция: Молодёжная наука Севера]
- Bennett K.D. 1996. Determination of the number of zones in a biostratigraphical sequence. *New Phytologist*, 132: 155–170. URL: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=2007579>.
- Bespalova T. 2022. Inventory of rare and red-listed species of higher vascular plants on the territory of the natural park 'Kondinsk lakes'. In: *Scientific research and environmental monitoring in specially protected natural areas of Russia and adjacent countries*, a collection of the All-Russian conference with international participation, dedicated to the 90th anniversary of the Central Forest State Natural Biosphere Reserve, 150th anniversary of the founder and first director Grigory Leonidovich Grave, 140th anniversary of the ecologist, Professor Vladimir Vladimirovich Stanchinsky. Limited Liability Company Partnership of Scientific Editions KMK, 256–262 (in Russian). [Беспалова, Т. Л. Инвентаризация редких и краснокнижных видов высших сосудистых растений на территории природного парка «Кондинские озера» // *Научные исследования и экологический мониторинг на особо охраняемых природных территориях России и сопредельных стран* : сборник Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию организации Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, 150-летию основателя и первого директора Григория Леонидовича Граве, 140-летию эколога, профессора Владимира Владимировича Станчинского. Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, С. 256–262]
- Bolin B., Degens E., Kempe S., Ketner P. 1979. The global carbon cycle. *Scope* 13. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1. DOI:10.1002/QJ.49710644716
- Clark J., Chapman P., Adamson J., Lane S. 2005. Influence of drought-induced acidification on the mobility of dissolved organic carbon in peat soils. *Global Change Biology*, 11(5), 791–809. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00937.x
- Chin Y., Aiken G., Danielsen K. 1997. Binding of pyrene to aquatic and commercial humic substances: the role of molecular weight and aromaticity. *Environ. Sci. Technol.*, 31: 1630–1635. DOI: 10.1021/es960404k
- Dalva M., Moore T. 1991. Sources and sinks of dissolved organic carbon in a forested swamp catchment. *Biogeochemistry*, 15(1). DOI: 10.1007/bf00002806
- Freeman C., Evans C., Monteith D., Reynolds B., Fenner N. 2001. Export of organic carbon from peat soils. *Nature* 412: 785. DOI: 10.1038/35090628
- Freeman C., Fenner N., Ostle N., Kang H., Dowrick D., Reynolds B., 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., Smith L. 2005. Amplified carbon release from vast West Siberian peatlands by 2100. *Geophysical research letters*, 32(9). DOI: 10.1029/2004GL020225
- Golovackaya E., Dyukarev E., Veretennikova E., Nikonova L., Smirnov S. 2022. ASSESSMENT OF CARBON Balance dynamics in bogs of the southern taiga subzone of Western Siberia (Tomsk region). *Soils and the environment*, № 4 (Last accessed 30.01.2025) (in Russian). [Головацкая Е., Дюкарев Е., Веретенникова Е., Никонова Л., Смирнов С. 2022. Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // *Почвы и окружающая среда*. № 4. (дата обращения: 30.01.2025)]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-dinamiki-balansa-ugleroda-v-bolotah-yuzhnotaezhnoy-podzony-zapadnoy-sibiri-tomskaya-oblast>
- Golovackaya E., Smirnova S. 2021. Geochemical peculiarities of peat deposits of oligotrophic bogs in the southern taiga zone of Western Siberia. *Geochemistry*, 66(6): 562–576 (in Russian). [Головацкая Е. А., Смирнова С. В. Геохимические особенности торфяных залежей олиготрофных болот южно-таежной зоны Западной Сибири // *Геохимия*, 66(6): 562–576].
- Grimm E. 1987. CONISS: A FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, 13: 13–35 URL: <https://typeset.io/papers/coniss-a-fortran-77-program-for-stratigraphically-289ieryrkl>
- Halaš A., Lamentowicz M., Łuców D., Słowiński M. 2023. Developing a new testate amoeba hydrological transfer function for permafrost peatlands of NW Siberia. *Quaternary Science Reviews*, 308: 108067. DOI: 10.1016/j.quascirev.2023.108067
- Inisheva L., Yudina N., Sokolova I. 2013. Dynamics of carbon-containing compounds in the waters of an oligotrophic bog. *Bulletin of Tomsk State Pedagogical University*, 8(136): 126–130 (in Russian). [Инишева Л. И., Юдина Н. В., Соколова И. В. Динамика углеродсодержащих соединений в водах олиготрофного болота // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2013. № 8 (136). С. 126–130].
- Lee H., Romero J. (eds.). 2023. *IPCC. Core Writing Team, Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Juggins, S. 2017. rioja: Analysis of Quaternary Science Data. R package version (0.9-21). URL: <http://cran.r-project.org/package=rioja> (Last accessed 20.06.2024).
- Kalbitz K., Geyer S. 2002. Different effects of peat degradation on dissolved organic carbon and nitrogen. *Organic Geochemistry*, 33(3): 319–326. DOI: 10.1016/S0146-6380(01)00163-2
- Kolka R., Weishampel P., Fröberg M. 2008. Measurement and importance of dissolved organic carbon. In *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring: Hoover C.M., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands*, pp. 32–58.
- Korotkikh N., Bespalova T. 2018. Flora and vegetation of the L.F. Stashkevich Nature Park «Kondinsk Lakes», Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra. In: *Ecology and Geography of Plants and Plant Communities : Proceedings of the IV International Scientific Conference*, pp. 471–475, Ekaterinburg (in Russian) [Коротких Н. Н., Беспалова Т. Л.

2018. Флора и растительность природного парка «Кондинские озера» им. Л.Ф. Сташкевича, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра // Экология и география растений и растительных сообществ. Екатеринбург, С. 471–475].
- Korotkikh N., Bepalova T., Butunina E., Yesengeldenova A. 2022. Floristic studies in the natural park 'Kondinskie lakes' named after L.F. Stashkevich. In: *Current state and prospects of development of the network of specially protected natural areas in industrially developed regions*. Proceedings of the II All-Russian conference dedicated to the 25th anniversary of the natural park 'Numto': a collection of scientific articles, Beloyarsky, 17 March 2022 (D.V. Moskovchenko ed.), pp. 64–73, Department of subsoil use and natural resources of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra; FGBUN FIC 'Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences'; Budgetary Institution of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra Nature Park 'Numto', Limited Liability Company 'Assorti', Ekaterinburg (in Russian) [Н. Н. Коротких, Т. Л. Беспалова, Е. А. Бутунина, А. Ю. Есенгельденова. 2022. Флористические исследования в природном парке «Кондинские озера» им. Л.Ф. Сташкевича // Современное состояние и перспектива развития сети особо охраняемых природных территорий в промышленно развитых регионах: Материалы II Всероссийской конференции, посвященной 25-летию природного парка «Нумто»: сборник научных статей, Белоярский, 17 марта 2022 года, отв. ред. Д.В. Московченко; Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры; ФГБУН ФИЦ «Тюменский научный центр СО РАН»; Бюджетное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Природный парк «Нумто». Екатеринбург: Общество с ограниченной ответственностью «Ассорти», С. 64–73].
- Kosykh N., Koronotova N., Lapshina E., Filippova N., Vishnyakova E., Stepanova V. 2017. Linear growth and production of Sphagnum mosses in the middle taiga zone of West Siberia // *Environmental dynamics and global climate change*, 8(1): 3–13. DOI: 10.17816/edgccc813-13
- Leenheer J. A., Croué J. P. 2003. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter. *Environmental science & technology*. 37(1): 18A-26A. DOI: 10.1021/es032333c
- Lapshina E., Korotkikh N., Bepalova T. 2020. Rare mosses of the Kondinskie lakes natural park named after Lf Stashkevich. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1: 74–80. DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/12
- Leonova O. 2023. Estimation of carbon stocks in peat deposits of different genesis in bogs of the northeast of the middle russian uplands. *Izvestiya Tula State University. Natural Sciences*, 1: 129–138. (in Russian). [Леонова О. А. 2023. Оценка запасов углерода в торфяных залежах различного генезиса на болотах северо-востока среднерусской возвышенности // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. № 1. С. 129–138].
- Levasheva M., Bepalova T., Popova T., Zherybyat'eva N. 2010. Use of recreational resources of the territory of the natural park «Kondinskie lakes». In: *Collection of materials VIII Yugra readings devoted to the 77th anniversary of the Khanty-Mansiysk District-Yugra* «Nature Management: state, problems and prospects». pp. 140–147 Khanty-Mansiysk (in Russian). [Левашева М.В., Беспалова Т.Л., Попова Т.В., Жеребятьева Н.В. Использование рекреационных ресурсов территории природного парка «Кондинские озера» // Сборник материалов VIII «Югорские чтения, посвященные 77-летию Ханты-Мансийского округа – Югры «Природопользование: состояние, проблемы и перспективы». Ханты-Мансийск, 2010. С. 140–147].
- Lou T., Xie H. 2006. Photochemical alteration of the molecular weight of dissolved organic matter. *Chemosphere*, 65(11): 2333–2342. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006
- Macdonald G., Beilman D., Kremenetski K., Sheng Y, Smith L., Velichko AA. 2006. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> variations. *Science*, 314(5797): 285–288. DOI: 10.1126/science.1131722
- Machado W., Franchini J. C, de Fátima Guimarães M., Tavares Filho J. 2020. Spectroscopic characterization of humic and fulvic acids in soil aggregates, Brazil. *Heliyon*. 6(6). DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04078
- Marcisz K., Jassey V., Kosakyan A., Krashevskaya V., Lahr D., Lara E., Lamentowicz Ł., Lamentowicz M., Macumber A., Mazei Y., Mitchell E., Nasser N., Patterson R., Roe H., Singer D., Tsyganov A., Fournier B. 2020. Testate amoeba functional traits and their use in paleoecology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8: 575966. DOI: 10.3389/fevo.2020.575966
- Matukhin R., Matukhina V., Vasiliev I., Mikhantjeva L., Popova G., Markov D., Ospennikova L., Skobeeva, E. 2000. Classification of Peat Types and Peat Deposits of West Siberia. *NITS OIGGM*, 1: 90.
- Mauquoy D., Van Geel B. 2013. Plant macrofossil methods and studies: Mire and peat macros. *Encycl. Quat. Sci*, 113: 637–656. DOI: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00206-5
- Minayeva T., Sirin A. 2012. Peatland biodiversity and climate change. *Biology Bulletin Reviews*, 2(2):164–175. DOI: 10.1134/s207908641202003x
- Moore T. 1987. Patterns of dissolved organic matter in subarctic peatlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 387–397. DOI: 10.1002/esp.3290120405
- Olefeldt D., Roulet T. 2012. Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G1). DOI: 10.1029/2011JG001819
- Peacock M., Freeman C., Gauci V., Lebron I., Evans C. D. 2015. Investigations of freezing and cold storage for the analysis of peatland dissolved organic carbon (DOC) and absorbance properties. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 17(7): 1290–1301. DOI: 10.1039/C5EM00126A
- Peuravuori J., Pihlaja K. 1997. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances. *Analytica Chimica Acta*, 337: 133–149. DOI: 10.1016/S0003-2670(96)00412-6
- Pittaway P., Eberhard F. A. 2014. UV absorbance test for measuring humified organic carbon in soil. *Proceedings of the 36th Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT 2014)*, 36: 229–235.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/> (Last accessed 20.06.2024).

- Rakhova S. 2023. Comparison of the spectral characteristics of dissolved organic matter in the upper swamp. In: *Youth Science of the North: Collection of materials of the I International Scientific and Practical Conference*, 148–153 pp. (in Russian) [Рахова С.Е. 2023. Сравнение спектральных характеристик растворенного органического вещества на верховом болоте // *Молодёжная наука Севера: Сборник материалов I Международной научно-практической конференции*. С. 148–153].
- Rakhova S. 2024. Seasonal dynamics of dissolved organic matter composition of an upland bog. In: *West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present*, Proceedings of the Seventh International Field Symposium, Khanty-Mansiysk, 15-27 August 2024. National Research Tomsk State University, Tomsk (in Russian) [Рахова С. 2024. Сезонная динамика состава растворенного органического вещества верхового болота // *Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Седьмого международного полевого симпозиума*, Ханты-Мансийск, 15–27 августа 2024 года. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет]
- Savicheva O., Inisheva L. 2003. Biochemical activity of peats of different macrofossil. *Chemistry of plant raw materials*, 3. (Last accessed 19.06.2024), (in Russian). [Савичева О.Г., Инишева Л.И. Биохимическая активность торфов разного ботанического состава // *Химия растительного сырья*. 2003. № 3. (дата обращения: 19.06.2024)]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/biohimicheskaya-aktivnost-torfov-raznogo-botanicheskogo-sostava>
- Scott M., Jones M., Woof C., Tipping E. 1998. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in drainage water from an upland peat system. *Environment International*, 24(5-6): 537–546. DOI: 10.1016/S0160-4120(98)00043-9
- Shanyova V. 2023. Approaches to determining the content of dissolved organic carbon in peat // *Business transformation: improvement management*, 1(2): 30-36] (in Russian) [Шанёва В.С. 2023. Подходы к определению содержания растворенного органического углерода в торфе // *Бизнес-трансформация: управление улучшениями*, 1(2): 30-36].
- Sheng Y., Smith L., MacDonald G., Kremenetski K., Frey K., Velichko 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 (GB3004): 1–14. DOI: 10.1029/2003GB002190
- Simpson G., Oksanen. 2020. analogue: Analogue and weighted averaging methods for palaeoecology. R package version 0.17-4. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/analogue/analogue.pdf> (Last accessed 20.06.2024).
- Stavishenko I.V. 2008. Monitoring of communities of wood-destroying fungi in the Kondinskiye Lakes Nature Park. *Siberian Ecological Journal*, 15(4): 645–654 (in Russian). [Ставищенко И.В. 2008. Мониторинг сообществ дереворазрушающих грибов природного парка "Кондинские озера" // *Сибирский экологический журнал*. Т. 15. №. 4. С. 645–654].
- Stepanova V. A. 2012. *Features of the macronutrient chemical composition of the soils of the upper swamps of the middle taiga of Western Siberia* : Abstract dis. cand. biol. sciences. Tomsk. Tomsk State Pedagogical University 22 pp. (in Russian) [Степанова В.А. 2012. Особенности макроэлементного химического состава почв верховых болот средней тайги Западной Сибири. Автореф. дисс. канд. биол. наук. Томск. Томский государственный педагогический университет. 22 с. URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000427276/SOURCE1>
- Syr'eva V. 2017. *Ecological framework of the natural park «Kondinskie lakes» as a basis for biodiversity conservation*: Master's thesis. Tyumen. Institute of Earth Sciences UTMN. 46 pp. (in Russian). [Сыр'ева В. С. 2017. Экологический каркас природного парка «Кондинские озера» как основа для сохранения биоразнообразия: магистерская диссертация. Тюмень. Институт Наук о Земле ТЮМГУ. 46 с.] URL: [https://elibrary.utmn.ru/jspui/bitstream/ru-tsu/11698/1/Syreva\\_VKR.pdf](https://elibrary.utmn.ru/jspui/bitstream/ru-tsu/11698/1/Syreva_VKR.pdf)
- Thurman E. Organic geochemistry of natural waters. 1985. *Developments in Biogeochemistry*, 2: 497 p.
- Traversa A., D'Orazio V., Mezzapesa G.N., Bonifacio E., Farrag K., Senesi N., Brunetti G. 2014. Chemical and spectroscopic characteristics of humic acids and dissolved organic matter along two Alfisol profiles. *Chemosphere*. 111: 184–94. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.03.063
- Tsyganov A., Zarov, E., Mazei Y., Kulkov M., Babeshko K., Yushkovets S., Payne R., Ratcliffe J., Fatyunina Y., Zazovskaya E., Lapshina E. 2021. Key periods of peatland development and environmental changes in the middle taiga zone of Western Siberia during the Holocene. *Ambio*, 50: 1896–1909. DOI: 10.1007/s13280-021-01545-7
- Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K., Pitkänen A. 2001. Carbon accumulation in West Siberian Mires, Russia Sphagnum peatland distribution in North America and Eurasia during the past 21,000 years. *Global biogeochemical cycles*. 15(2): 285–296. DOI: 10.1029/2000GB001312
- Uyguner C., Bekbolet M. 2005. Implementation of spectroscopic parameters for practical monitoring of natural organic matter. *Desalination*, 176(1-3): 47–55. DOI: 10.1016/j.desal.2004.10.027
- Voronov A., Mihajlova G. 1971. Modern vegetation. *Atlas of the Tyumen Oblast*, 23(2) (in Russian). [Воронов А. Г., Михайлова Г. А. 1971. Современная растительность // *Атлас Тюменской области*. Вып. I. М.; Тюмень: ГУГК, 1971. С. 23 (2)].
- Waddington J., Roulet N. 1997. Groundwater flow and dissolved carbon movement in a boreal peatland. *Journal of Hydrology*, 191(1-4): 122–138. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03075-2
- Weishaar J., Aiken G., Bergamaschi B., Fram M., Fujii R., Mopper, K. 2003. Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon. *Environmental Science & Technology*, 37(20): 4702–4708. DOI: 10.1021/es030360x
- Wickham H. 2016. Data Analysis. In: ggplot2. Use R! *Springer, Cham*. DOI: 10.1007/978-3-319-24277-4\_9
- William C., Timothy J., Vijay M. 2016. Using Dissolved Organic Carbon Concentration and Character Data to Assess Land Use Change Effects on Coastal Waters. In: *South Carolina Water Resources Conference*.
- Worrall F., Gibson H., Burt T. 2008. Production vs. solubility in controlling runoff of DOC from peat soils – The use of an event analysis. *Journal of hydrology*, 358(1-2): 84–95. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.037
- Yu Z., Loise J., Brosseau D., Beilman D., Hunt S. 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical research letters*, 37(13). DOI: 10.1029/2010GL043584

Zarov, E.A. 2013 Types of peat from upland bogs and their physico-chemical properties (on the example of the Mukhrino marsh massif, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra). In: *V.I. Shpilman "Problems of regional nature management and the history of geological prospecting in Western Siberia"*, Khanty-Mansiysk: 118–121 (in Russian) [Заров, Е. А. 2013. Виды торфа верховых болот и их физико-химические свойства (на примере болотного массива Мухрино, ХМАО-Югра) // *ВИ Шпильмана «Проблемы регионального природопользования и история геологического поиска в Западной Сибири», Ханты-Мансийск: 118–121*].

Zarov E., Lapshina E., Kuhlmann I. and Schulze Ernst-Detlef. 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

Zemcov A., Mezencev A., Inisheva L. 1998. *Bogs of Western Siberia: their role in the biosphere*, SibNIIT, TSU, Tomsk, 72 p. (in Russian) [Земцов А., Мезенцев А., Инишева Л. 1998. Болота Западной Сибири: их роль в биосфере. Томск: ТГУ, СибНИИТ, 72 с.].

Zverev A.A. 2007. *Information technologies in vegetation research*. Innovative educational program, Federal Agency for Education, Tomsk State University, TML-Press. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000247692> (in Russian) [Зверев А.А. 2007. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова: учебное пособие. Инновационная образовательная программа / Федеральное агентство по образованию, Томский гос. ун-т. Томск : ТМЛ-Пресс. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000247692>].

Поступила в редакцию: 10.07.2024  
Переработанный вариант: 31.08.2024  
Принято в печать: 19.03.2025