

# ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

## Environmental Dynamics and Global Climate Change



Том  
Volume

**16**

Выпуск  
Issue

**1**

**2025**

# ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Volume 16  
Issue 1

2025

<https://edgcccjournal.org>

## EDITORIAL BOARD

### EDITORS-IN-CHIEF

*Mikhail V. Glagolev*, PhD of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

### DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

*Elena D. Lapshina*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Khanty-Mansiysk, Russia)

### EDITORIAL BOARD

*Elena V. Agbalyan*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Salekhard, Russia)

*Sergey A. Blagodatskiy*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Stuttgart, Germany)

*Sergey S. Bykhovets*, PhD in Geogr. Sci. (Pushchino, Russia)

*Vasiliy A. Vavilin*, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

*Aleksandra A. Gol'eva*, Dr. habil. of Geogr. Sci. (Moscow, Russia)

*Egor A. Dyukarev*, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tomsk, Russia)

*Nikolay B. Ermakov*, Dr. habil. of Biol. Sci., senior researcher (Yalta, Russia)

*Radomir B. Zaripov*, PhD in Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

*Dmitriy V. Karelin*, Dr. habil. of Biol. (Moscow, Russia)

*Roman A. Kolesnikov*, PhD in Geogr. Sci. (Salekhard, Russia)

*Nadezhda A. Konstantinova*, Dr. habil. of Biol. Sciences, Professor (Apatity, Russia)

*Oleg P. Kotsyurbenko*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Khanty-Mansiysk, Russia)

*Alexei V. Kouraev*, PhD in Geogr. Sci., Assistant professor (Toulouse, France)

*Irina N. Kurganova*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Pushchino, Russia)

*Trofim K. Maksimov*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Yakutsk, Russia)

*Shamil S. Maksyutov*, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tsukuba, Japan)

*Sergey V. Mamikhin*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

*Vasiliy B. Martynenko*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Ufa, Russia)

*Nsdezhdha V. Matveeva*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Sankt-Petersburg, Russia)

*Evgeniy Y. Milanovskiy*, Dr. habil. of Biol. Sci., Associate Professor (Pushchino, Russia)

*Ol'ga V. Morozova*, PhD in Geogr. Sci. (Moscow, Russia)

*Valentina Y. Neshataeva*, Dr. habil. of Biol. Sci., senior researcher (St. Petersburg, Russia)

*Aleksandr V. Ol'chev*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Moscow, Russia)

*Oleg S. Pokrovskiy*, PhD in Geol.-Mineral. Sci. (Tomsk, Russia)

*Alexander V. Puzanov*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Barnaul, Russia)

*Irina A. Repina*, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

*Irina M. Ryzhova*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Moscow, Russia)

*Yuriy A. Semenishchenkov*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Bryansk, Russia)

*Ol'ga N. Solomina*, Dr. habil. of Geogr. Sci., corresp. member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*Viktor M. Stepanenko*, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

*Alexey L. Stepanov*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

*Pavel V. Frolov*, PhD in Biol. Sci. (Pushchino, Russia)

*Evgeniy V. Shein*, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

*Sergey A. Shoba*, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor, Corresponding Member of the RAS (Moscow, Russia)

*Mariusz Lamentowicz*, Dr. habil., Full-Professor (Poznan, Poland)

*Kári Fannar Lárusson*, PhD, CAFF program manager (Akureyri, Iceland)

*Ivan Mammarella*, PhD, Assistant Professor (Helsinki, Finland)

*Vincent F. Warwick*, Dr., Full-Professor (Quebec Canada)

### Editorial Office

*O.A. Frolov*, PhD, managing editor (Moscow, Russia)

*D.D. Ochirova*, technical editor (Moscow, Russia)

### Founder:

Yugra State University. 628012, Russia, Khanty-Mansi autonomous Area, Khanty-Mansiysk, Chekhova str., 16. Phone/fax: +7(3467)377-000, ext. 101, WEB: [www.ugrasu.ru](http://www.ugrasu.ru)

National Research Tomsk State University. 634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave, 36. Phone: +7(3822)58-98-52, fax: +7(3822)52-95-85, WEB: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science. 656038, Russia, Barnaul, Molodezhnaya str., 1. Phone: +7(3852)66-64-60, fax: +7(3852)24-03-96, WEB: [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru)

Arctic Research Center of the Yamal-Nenets autonomous Area. 629001, Russia, Yamal-Nenets autonomous District, Salekhard, Respublic str., 73. Phone/fax: +7(34922)441-32, WEB: [www.arctic.yanao.ru](http://www.arctic.yanao.ru)

# ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Том 16  
Выпуск 1  
**2025**

Журнал издается с 2008 года

<https://edgccjournal.org>

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### ГЛАВНЫЕ РЕДАКТОРЫ

*Михаил Владимирович Глаголев*, канд. биол. наук (Москва, Россия)

### ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

*Елена Дмитриевна Лапицина*, д-р биол. наук, профессор (Ханты-Мансийск, Россия)

### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

*Е.В. Азбалян*, д-р биол. наук (Салехард, Россия)  
*С.А. Благодатский*, д-р биол. наук (Штутгарт, Германия)  
*С.С. Быховец*, канд. геогр. наук (Пушино, Россия)  
*В.А. Вавилин*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)  
*А.А. Гольева*, д-р геогр. наук (Москва, Россия)  
*Е.А. Дюкарев*, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия)  
*Н.В. Ермаков*, д-р биол. наук, старший научный сотрудник (Ялта, Россия)  
*Р.Б. Зарипов*, канд. физ.-мат. наук (Москва, Россия)  
*Д.В. Карелин*, д-р биол. наук (Москва, Россия)  
*Р.А. Колесников*, канд. геогр. наук (Салехард, Россия)  
*Н.А. Константинова*, д-р биол. наук, профессор (Апатиты, Россия)  
*О.Р. Коцюрбенко*, д-р биол. наук (Ханты-Мансийск, Россия)  
*А.В. Кураев*, канд. геогр. наук, доцент (Тулуза, Франция)  
*И.Н. Курганова*, д-р биол. наук (Пушино, Россия)  
*Т.Х. Максимов*, д-р биол. наук (Якутск, Россия)  
*Ш.Ш. Максюттов*, канд. физ.-мат. наук (Цукуба, Япония)  
*С.В. Махихин*, д-р биол. наук (Москва, Россия)  
*В.Б. Мартыненко*, д-р биол. наук, профессор (Уфа, Россия)  
*Н.В. Матвеева*, д-р биол. наук (Санкт-Петербург, Россия)  
*Е.Ю. Милановский*, д-р биол. наук, доцент (Пушино, Россия)

*О.В. Морозова*, канд. геогр. наук (Москва, Россия)  
*В.Ю. Нешатаева*, д-р биол. наук, старший научный сотрудник (Санкт-Петербург, Россия)  
*А.В. Ольчев*, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)  
*О.С. Покровский*, канд. геол.-минерал. наук (Томск, Россия)  
*А.В. Пузанов*, д-р биол. наук, профессор (Барнаул, Россия)  
*И.А. Репина*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)  
*И.М. Рыжова*, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)  
*Ю.А. Семенецников*, д-р биол. наук, профессор (Брянск, Россия)  
*О.Н. Соломина*, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)  
*В.М. Степаненко*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)  
*А.Л. Степанов*, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)  
*П.В. Фролов*, канд. биол. наук (Пушино, Россия)  
*Е.В. Шейн*, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)  
*С.А. Шоба*, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)  
*М. Ламентович*, д-р, профессор (Познань, Польша)  
*И. Маммарелла*, д-р, доцент (Хельсинки, Финляндия)  
*В.Ф. Варвик*, д-р, профессор (Квебек, Канада)

### Редакция

*О.А. Фролов*, канд. биол. наук, заведующий редакцией (Москва, Россия)  
*Д.Д. Очирова*, редактор (Москва, Россия)

### Учредители:

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

628012, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, г. Ханты-Мансийск ул. Чехова, 16.  
 Тел./факс: +7(3467)37-70-00 (доб. 101), WEB: [www.ugrasu.ru](http://www.ugrasu.ru)

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. Тел.: +7(3822)58-98-52, факс: +7(3822)52-95-85, WEB: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

ФГБУН Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской Академии наук.  
 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. Тел.: +7(3852)66-64-60, факс: +7(3852)24-03-96, WEB: [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru)

ГКУ Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики».

629008, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, 73. Тел./факс: +7(34922)441-32,  
 WEB: [www.arctic.yanao.ru](http://www.arctic.yanao.ru)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций, связи и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-82594 от 18.01.2022 г.

**Индексируется:** Science Index (РИНЦ), Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, EBSCO

Архив журнала «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата» размещен в сети Интернет [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), <https://edgccjournal.org/EDGCC/issue/archive>

## СОДЕРЖАНИЕ / CONTENT

---

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ / EXPERIMENTAL WORKS**

---

*Schuryakov D.S.*

The history of the development of the Ishtan mire massif (Western Siberia) 4-12

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

Features of Carbon Forms Distribution  
in Peat Deposits of an Oligotrophic Bog in the Kondinsky Lakes Nature Park 13-32

*Grenaderova A.V., Sharafutdinov R.A., Mitev A.R., Mikhailova A.B.*

Holocene environmental conditions in the Western part of Eastern Sayan low-mountain  
relief: based on comprehensive study of the Mina mire deposits 33-48

### **КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ / NOTES**

---

*Morozov A.P., Moskvina Yu.P.*

Changes in the water-thermal regime of permafrost swamps in western siberia in response to  
climate warming ..... 49-53

## THE HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF THE ISHTAN MIRE MASSIF (WESTERN SIBERIA)

*Shchuryakov D.S.*<sup>1,2</sup>

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2)</sup>Институт биологии внутренних вод Российской академии наук им. И. Д. Папанин, Борок, Россия

\*shuryakoff@yandex.ru

**Citation:** Shchuryakov D.S. 2025. The history of the development of the Ishtan mire massif (Western Siberia). *Environmental dynamics and global climate change*. 16(1): 4–12.

**DOI:** 10.18822/edgcc634517

Проведение специализированных палеоэкологических исследований в области болотоведения предполагает постоянное пополнение базы знаний о динамике и структуре пойменных болотных экосистем актуальными данными. Целью статьи является представление особенностей болотообразовательного процесса долинного болота на основе построения сукцессионных рядов палеосообществ с учетом влияния экологических факторов и характеристика динамических процессов, происходящих в фитоценозах пойменных болот. На основе результатов исследования ботанического состава торфа из трёх скважин (120 образцов), расположенных в различных частях крупного болотного массива, построены сукцессионные ряды и проанализированы особенности болотообразовательного процесса для низинного долинного болота Иштан на юге Томской области. Определено, что для большей части болота, в настоящее время представляющего собой полидоминантную содру, торфообразование началось с заболачивания леса. Дальнейшее расширение площади болота происходило в результате заболачивания пойменных лесов центральной части поймы. При этом нижние слои торфа притеррасной части, отмеченные наибольшей мощностью залежи (4.5 м), сложены травяными остатками (вахново-осоковый торф). Развитие растительности болотного массива Иштан характеризуется высокой динамичностью. На разных этапах эволюции болота его облик формировали своеобразные растительные сообщества с преобладанием различных видов деревьев, трав, мхов и их комбинаций. Процесс формирования растительного покрова болота Иштан характеризуется, с одной стороны, усложнением фитоценотической структуры (появление развитой ярусности, увеличение видового разнообразия), с другой – обеднением флористического состава (появление монодоминантных сообществ с *Carex lasiocarpa* или *Menyanthes trifoliata*).

**Ключевые слова:** долинное болото, сукцессионные ряды, ботанический анализ торфа, реконструкция растительного покрова, торфяная залежь.

The study of peat macrofossil composition of peat is an important element of paleoecological research of mire. This makes it possible to identify the dynamics and features of the mire formation process. Despite their complexity and the small number of appropriate specialists, such studies do not lose their relevance, as confirmed by many publications in recent years [Kalnina et al., 2015; Baisheva et al., 2019; Vincze et al., 2019; Sinyutkina, 2020; Razjigaeva, 2021; Logvinova et al., 2022; Kutenkov et al., 2022; Maslov, 2023].

In this paper we present the results of studies of the mire formation process in the Ob River valley, based on the construction of successional series of paleoplant communities. We chose the Ishtan mire as the object of study. It is located in the southern part of the Krivosheinsky and northern part of the Shegarsky districts of the Tomsk region (Fig. 1). Drilling of the peat deposit with core sampling was carried out in different parts of the mire, taking into account environmental conditions and vegetation cover. The cores were named "I1", "I2" and "I3". In order to characterize the peat deposit, we prepared samples and analyzed the botanical composition of peat, the degree of decomposition of plant macrofossils and the level of mineral pollution of all three cores (120 samples in total): "I1" - 45 samples, "I2" - 40, "I3" - 35. Sampling was carried out at intervals of 10 cm. The results of the study of the botanical composition of peat are described in an earlier publication [Author, 2023].

The humified part of the samples was washed under running water through a sieve with a mesh diameter of 0.25 mm. The prepared sample was then examined under a microscope. Macroscopic remains

were identified using specialized atlases [Dombrovskaya et al., 1959; Katz et al., 1977]. The degree of peat decomposition was assessed using macroscopic and microscopic methods. The classification proposed in 1976 by S. N. Tyuremnov was used as a methodological basis for peat classification [Tyuremnov, 1976].

**Core sampling «И1».** It is located in the near-terrace part of the massif. The depth of peat here is 4.5 m. Mire formation in this area differs from others. It began with *Carex-Menyanthes* communities. Tree species did not play a primary role in the formation of phytocenoses throughout the development of the mire (Fig. 2). For this site, the most frequent changes in the directions of transitions of peat types were noted (31 out of 61). The change of plant communities in response to changing environmental conditions occurred here more intensively.

**Core sampling «И2».** It is located in the central part of the mire massif, occupied by a community dominated by *Betula fruticosa* and *Carex lasiocarpa*. The beginning of mire formation in this area is associated with tree (coniferous) communities (Fig. 3). It is characterized by high stability and long-term dominance of trees. With a change in conditions (primarily moisture), sedges and pines settled on the site. As a result of further depletion of conditions, a period begins when the role of sphagnum mosses increases (up to 15% of the cover). Subsequently, the development of a grass community dominated by *Carex lasiocarpa* was discovered on the site. However, a gradual change in the structure of phytocenoses ultimately led to the formation of a complex multi-tiered community.

**Core sampling «И3».** It is located in the center of the forested zone of the mire, in an area where the highest plant species diversity was noted during geobotanical studies. The depth of peat here is 3.5 m. Communities with a developed tree layer occupy more than half of the mire area. Here, the greatest role of woody plants in the formation of phytocenoses is indicated throughout the history of the mire development (Fig. 4). Stable communities of woody (mainly coniferous) plants disappeared only once. In that case, they were replaced by a monodominant community of *Menyanthes trifoliata*. For this type of mire, *Menyanthes trifoliata* is an important peat-forming plant. According to our results, *Menyanthes* remains are the most common macrofossils in peat. In these types of mire, they are often found together with woody plants.

It can be concluded that the mire-forming process in most of the territory began with water-logging of coniferous tree communities. With the overall high dynamics of phytocenosis change, this process was most clearly manifested in the near-terrace part. We associate intensive structural transformations with the influence of flood processes, with the active approach/removal of the Ob River bed and flooding of the territory. The active influence of the river is also indicated by the shells of freshwater mollusks, often found in peat at different depths. Based on our research, we come to the conclusion that the vegetation in the mires of river valleys developed both in the direction of increasing the complexity of the phytocenotic structure (for example, increasing species diversity) and in the direction of depletion of the floristic composition (the appearance of monodominant communities with *Carex lasiocarpa* or *Menyanthes trifoliata*).

**Keywords:** river valley mire, succession series, macrofossil analysis, vegetation paleo-reconstruction, peat deposit.

## ВВЕДЕНИЕ

Сукцессия – это направленная и постепенная смена сообществ во времени, обусловленная внешними или внутренними факторами. Построение сукцессионных рядов является одним из инструментов для изучения динамики экосистем и ландшафтов, индикации экологического состояния среды.

Исследование ботанического состава торфа – важный элемент в палеоэкологических изысканиях, позволяющий определить динамику и особенности болотообразовательного процесса территории, в т.ч. построить сукцессионные ряды. Несмотря на свою трудоемкость и относительно небольшое число специалистов-торфоведов, подобные исследования не теряют своей актуальности, что подтверждается отечественными [Baisheva et al., 2019; Sinyutkina, 2020; Razjigaeva, 2021; Logvinova et al., 2022; Kutenkov et al., 2022; Nosova et al., 2022; Maslov, 2023] и зарубежными [Kalnina et al., 2015; Vincze et al., 2019] публикациями последних лет различных научных направлений.

На современном уровне ботанический анализ торфа используется в комплексных палеоэкологических исследованиях болот Западной Сибири [Lamentowicz et al., 2015; Tsyganov et al., 2021]. Информативная характеристика основных типов стратиграфического строения на основе детального изучения ботанического состава колонок торфа и описание истории развития торфяных болот Западной Сибири приведены в работе Е.Д. Лапшиной и Е.А. Зарова [Lapshina, Zarov, 2023].

Главная цель данной работы – выявление особенностей болотообразовательного процесса пойменного болота в долине р. Оби на основе построения сукцессионных рядов палеосообществ с учетом влияния экологических факторов и описание фитоценозов, сменявших друг друга в процессе торфонакопления. Для достижения обозначенной цели нами поставлены и решены задачи: 1. Бурение торфяной залежи на трёх участках и отбор образцов торфа. 2. Анализ ботанического состава торфа. 3. Построение сукцессионных рядов палеосообществ исследуемой территории с последующим выявлением особенностей и закономерностей болотообразовательного процесса.

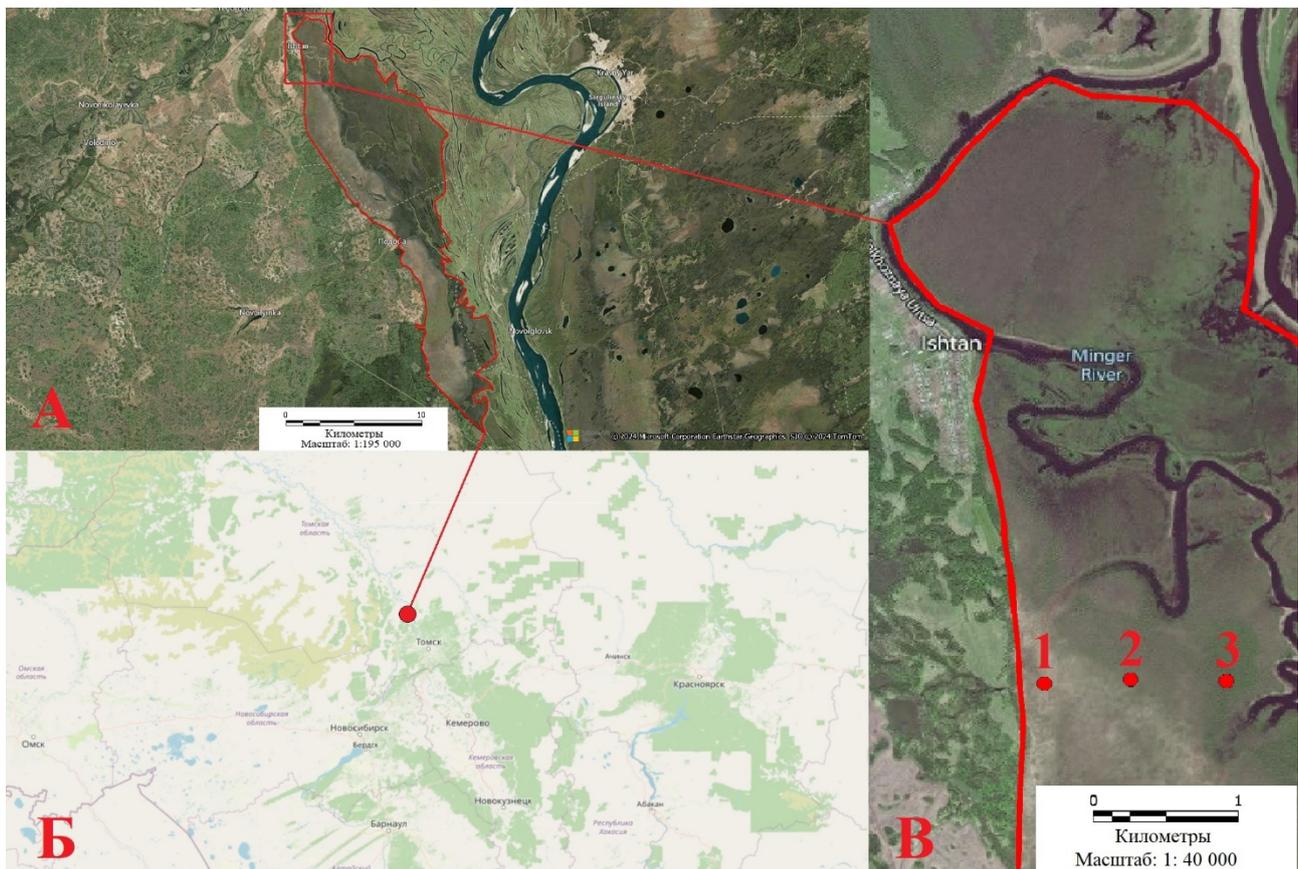
Научная значимость исследования заключается в расширении наших знаний о динамике и структуре пойменных болотных экосистем на юге лесной зоны Западной Сибири. Полученные данные о последовательных сменах видового состава в ходе сукцессии могут быть использованы для дальнейших исследований в области реконструкции прошлых климатических эпох и прогнозирования современных тенденций изменения климата.

В качестве объекта исследования нами выбрано болото Иштан (57°56'126 N, 84°13'598 E), залегающее в левобережной пойме р. Оби, в непосредственной близости от с. Иштан и с. Подоба (расположенных на первой надпойменной террасе, к северо-западу и западу от болотного массива соответственно), в южной части Кривошеинского и северной части Шегарского районов Томской области. Площадь около 124 км<sup>2</sup>. Болотный массив вытянут с севера на юг на 32 км при максимальной ширине 8 км. Относится к типу низинных пойменных (притеррасных) болот. Залесенные участки занимают более половины от общей площади болота. Массив находится в 10 км вниз по течению от места впадения р. Томь в р. Обь.

По ландшафтно-экологическому районированию исследуемая территория относится к бореально-континентальной ландшафтной группе, широтно-зональному таёжному подтипу [Landshaftnaya ..., 1980]. Согласно О.Л. Лисс и соавт., массив относится к подтаежной болотной провинции западносибирских атлантических евтрофных осоково-гипновых болот [Liss et al., 2001]. Согласно Львову Ю.А., объект относится к Обь-Иртышскому пойменному болотному округу, к Кожевниковскому району низинных гипновых и осоково-гипновых притеррасных болот [L'vov, 1991]. По схеме природного районирования Западной Сибири территория расположена в границах подзоны южной тайги [Pi'ina, 1985].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бурение торфяной залежи проведено в различных по экологическим условиям и растительному покрову частях болота, в его северной части, в 3-4 км к юго-востоку от с. Иштан (Рис. 1). Для этого использован ручной пробоотборник для почвы и торфяных отложений «Eijkelkamp» модели 04.09. Скважинам присвоены названия «И1», «И2» и «И3». Для характеристики торфяной залежи нами выполнена пробоподготовка и проведён анализ ботанического состава торфа, степени разложения растительных остатков, наличия минерального загрязнения всех 3 скважин (120 образцов): «И1» – 45 образцов, «И2» – 40, «И3» – 35. Пробоотбор проведен с шагом в 10 см. Определение ботанического состава торфа из скважины «И1» проводилось на базе группы биогеоценологии и болотоведения НИИ биологии и биофизики Томского государственного университета. Образцы из скважин «И2» и «И3» исследованы на базе лаборатории болотных экосистем ИБ КарНЦ РАН. Результаты изучения ботанического состава торфа болота подробно изложены в отдельной публикации [Щуряков, 2023]. Стратиграфические диаграммы ботанического состава торфа, представленные в приложениях А, В, Д, построены с помощью компьютерной программы «Korpi» [Kutenkov, 2013].



**Рис. 1.** Карта с географической привязкой болота Иштан на территории Томской области: А – спутниковый снимок и контуры болота (слой «гибрид» <https://www.bing.com/>); Б – расположение болота Иштан на территории Томской области ([www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)); В – район основных исследований. Цифрами на карте обозначены номера площадок и скважин (слой «гибрид» <https://www.bing.com/>).

**Fig. 1.** A map with geographical reference of the Ishtan mire in the Tomsk region: А – Satellite image and contours of the mire (hybrid layer <https://www.bing.com/>); Б – The location of the Ishtan mire in the Tomsk region ([www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)); В – Research area. The points on the map shows the sites of drilling (the "hybrid" layer <https://www.bing.com/>).

Образцы промывались от гумифицированной части под водой через сито с диаметром отверстий 0.25 мм. В дальнейшем подготовленный образец рассматривался под микроскопом. Определение остатков велось по специализированным атласам [Dombrovskaya et al., 1959; Kats et al., 1977]. Оценка степени разложения торфа проводилась макроскопическим (таблица признаков определения степени разложения И.Ф. Ларгина) и микроскопическим методом. Определение степени минерального загрязнения торфа выполнено микроскопическим методом. За методическую основу классификации торфов взята классификация, предложенная в 1976 г. С.Н. Тюремновым [Тюремнов, 1976]. По ней в название торфа входят только те торфообразователи, доля которых составляет не менее 20%. В случае, если торф сформирован несколькими торфообразователями в количестве не менее 20% каждый, все они включаются в название торфа в порядке увеличения их доли. Латинские названия растений приводятся по С.К. Черепанову [Cherepanov, 1995].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура залежи исследуемого болотного массива сходна со строением пойменных болот Оби, представленным Е.Д. Лапшиной и Е.А. Заровым [Lapshina, Zarov, 2023]. Так, наибольшей глубиной залежи характеризуется притеррасная часть массива. Подтверждается и характерная дифференциация поймы по зонам водно-минерального питания, приводящая к различиям в структуре и видовом составе фитоценозов [Lapshina, 1987, 1995]. Главной же особенностью болотообразования пойменных систем, подтвердившейся и для нашего объекта, является идентичная стадия начала торфообразовательных процессов, сопровождавшаяся для притеррасной – осоково-вахтовыми, а для остальных частей – древесными сообществами. Отмечена меньшая доля остатков папоротников в

торфе в процессе развития болота. При этом общая картина ботанического состава колонок аналогична и представляет собой чередование древесных, травяных, гипновых торфов и их комбинаций.

### Скважина «И1»

Торфяная колонка отобрана в притеррасной части массива, мощность залежи составляет 4.5 м. Болотообразование в данной части болота отличается от двух других изученных участков. Оно началось с осоково-вахтовых сообществ, и древесные виды на всем протяжении развития болота не играли заметной роли в сложении фитоценозов (Рис. 2). Для данного участка отмечена наибольшая частота смен видов торфов (31 из 61). На протяжении практически всей истории развития болота в притеррасной части было развито сначала древесное-осоково-болотнотравное (хвощ, вахта) сообщество, которое потом сменилось вахтово-гипновым осочником с доминированием *Carex lasiocarpa*. Особо выделяется еще и придонное осоково-вахтовое и современное сообщество с *C. omskiana*. Развитие растительных сообществ происходило наиболее интенсивно: нередко в травяные сообщества внедрялись древесные растения, заселялись гипновые, и наоборот (Приложение А). Изменения экологических условий проявлялись наиболее явно.



Рис. 2. Сукцессионный ряд участка бурения скважины «И1».

Fig. 2. Succession series of the drilling site «И1».

### Скважина «И2»

Вторая скважина, глубиной 4 м, заложена в центральной части массива, которая занята кустарниково-гипново-осоковым сообществом с доминированием *Betula fruticosa*, *Carex lasiocarpa* и гипновых мхов. Торфонакопление началось с заболачивания хвойного леса (Рис. 3), на месте которого сформировалось болотное сообщество лесного облика (известное в Сибири под названием согра), отлагавшее древесный торф с большим или меньшим участием вахты, развивавшейся в топких понижениях между приствольными повышениями деревьев. Данное сообщество отличалось длительным стабильным существованием (Приложение Б).

В ходе смены условий (в первую очередь, увлажнения) на участок заселились осоки и гипновые с небольшим участием (до 15%) сфагнов. В дальнейшем на участке регистрируется развитие травяного сообщества доминированием *Carex lasiocarpa*. Постепенное изменение структуры осокового фитоценоза, связанного с повышением поверхности болота в процессе торфонакопления и незначительным понижением уровня болотных вод, в конечном итоге привело к формированию сложного многоярусного кустарниково-осоково-гипнового сообщества.

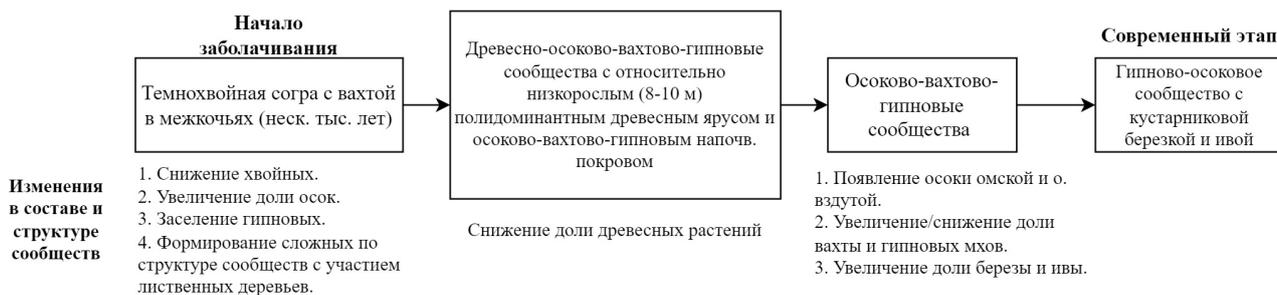


Рис. 3. Сукцессионный ряд участка бурения скважины «И2».

Fig. 3. Succession series of the drilling site «И2».

## Скважина «ИЗ»

Скважина заложена в центре согры, на территории которой в ходе геоботанического исследования отмечено наибольшее видовое разнообразие растений. Торфяная залежь имеет глубину 3.5 м (Приложение В). В современном растительном покрове залесенные сообщества занимают более половины площади болотного массива. Древесные растения имели большое значение в растительном покрове, но их участие существенно изменялось (не оставалось постоянным) на всем протяжении развития болота.

Устойчивые сообщества древесных, преимущественно хвойных растений, исчезали лишь однажды, и в таком случае их заменяло монодоминантное вахтовое сообщество. Для данного типа болот вахта является важным растением-торфообразователем, по результатам наших исследований, это самый часто встречаемый вид в торфе. На рассматриваемой территории она нередко сопутствует древесным растениям, её участие меняется от незначительной примеси до 80%.

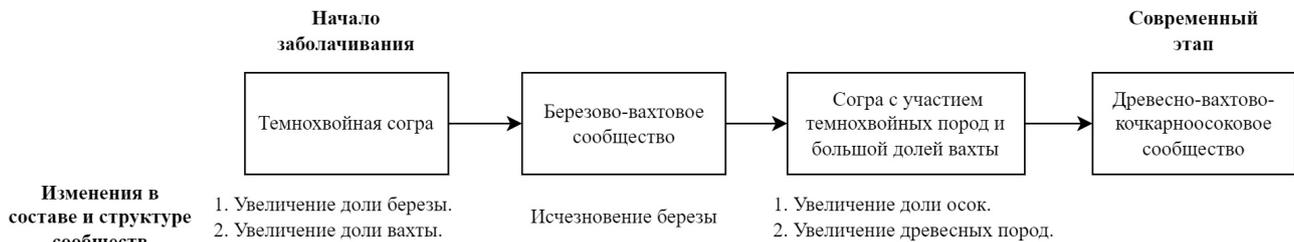


Рис. 4. Сукцессионный ряд участка бурения скважины «ИЗ».

Fig. 4. Succession series of the drilling site «ИЗ».

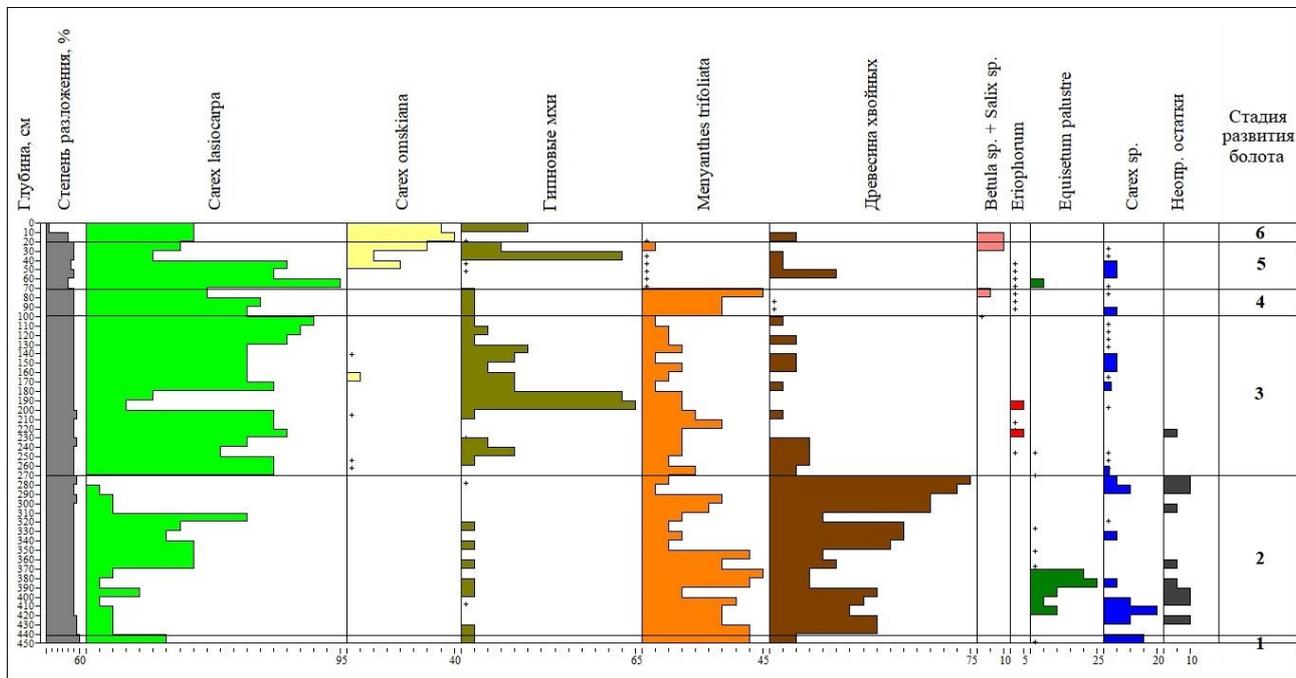
По результатам построения сукцессионных рядов можно заключить, что процесс для большей части территории массива начался с заболачивания темнохвойных пойменных лесов. Полученные данные позволяют выявить следующие особенности и закономерности развития болота Иштан в пойме р. Оби:

1. Более частые смены фитоценозов характерны для притеррасной части болота, где оно испытывает влияние как речных, так и грунтовых вод.

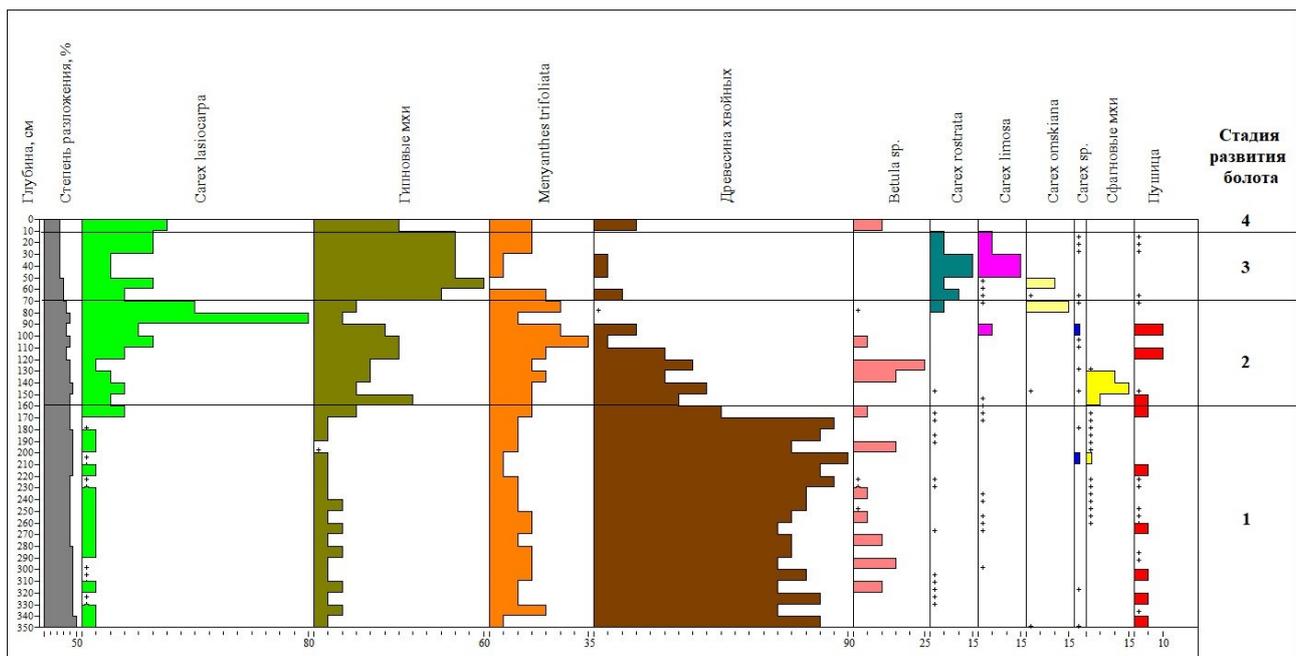
2. Сукцессионные смены фитоценозов мы связываем с влиянием пойменных процессов, в частности, с активным приближением/удалением русла р. Оби и её многочисленных проток, экстремальными паводками, постоянным подтоплением территории. На влияние реки указывают и часто встречающиеся на разных глубинах раковины пресноводных моллюсков. Здесь же необходимо учесть и влияние богатых кальцием грунтовых вод, которые выклиниваются из-под террасы. Раковины моллюсков могут быть связаны именно с выходами грунтовых вод, поскольку для построения раковин нужен кальций, которого не так много в полых водах реки.

3. Развитие растительного покрова пойменных болот может идти как в направлении усложнения фитоценотической структуры (увеличение видового разнообразия, усложнение ярусности), так и в сторону обеднения флористического состава (появление монодоминантных сообществ с *Carex lasiocarpa* или *Menyanthes trifoliata*), что напрямую связано с режимом увлажнения.

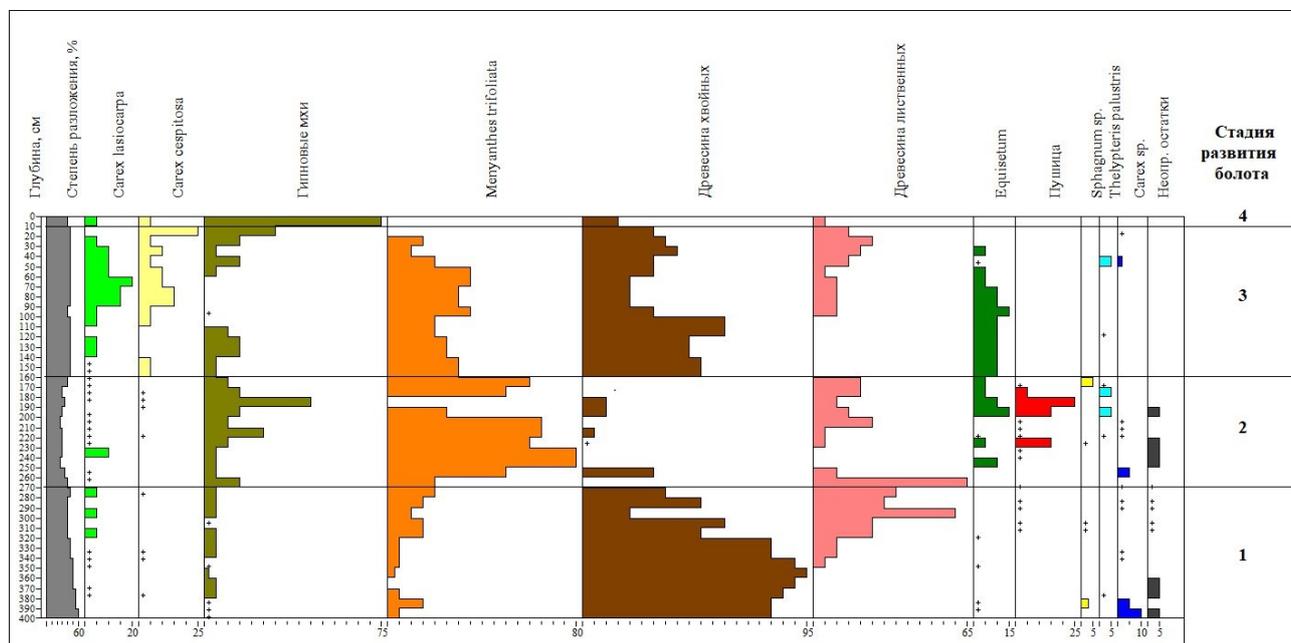
**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Стратиграфическая диаграмма скважины «И1»**  
**APPENDIX A**  
**Stratigraphic diagram of the drilling site «И1»**



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Стратиграфическая диаграмма скважины «И2»**  
**APPENDIX Б**  
**Stratigraphic diagram of the drilling site «И2»**



**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**Стратиграфическая диаграмма скважины «ИЗ»**  
**APPENDIX B**  
**Stratigraphic diagram of the drilling site «ИЗ»**



**ЛИТЕРАТУРА**

- Baisheva E.Z., Muldashev A.A., Martynenko V.B., Fedorov N.I., Bikbaev I.G., Minaeva N.Yu., Sirin A.A. 2019. Plant diversity and spatial vegetation structure of the calcareous spring fen in the “Arkaulovskoye Mire” Protected Area (Southern Urals, Russia). *Mires and Peat*, 24(13): 25 pp. DOI: 10.19189/МаР.2019.0МВ.StA.1890
- Cherepanov S.K. 1995. *Vascular plants of Russia and adjacent countries (within the former USSR)*. Sankt-Peterburg, 990 p. (in Russian). [Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). Санкт-Петербург, 990 с.]
- Dombrovskaya A.V., Koreneva M.M., Tyuremnov S.N. 1959. *Atlas of plant remains found in peat*. Gosenergoizdat, Moscow–Leningrad, 137 p. (in Russian). [Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. 1959. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М.–Л.: Госэнергоиздат, 137 с.]
- Gudilin I.S. (ed.). 1980. *Landscape map of the USSR scale 1:2500000*. Ministerstvo geologii USSR, Moscow. (in Russian). [Гудилин И.С. (ред.). 1980. Ландшафтная карта СССР масштаба 1:2500000. М.: Министерство геологии СССР.]
- Il'ina I.S., Lapshina E.I., Lavrenko N.N., Mel'tser L.I., Romanova E.A., Bogoiavlenskii B.A., Makhno V.D. 1985. *Vegetation cover of the West Siberian Plain*. Novosibirsk: Nauka, 251 p. (in Russian). [Ильина И.С., Лапшина Е.И., Лавренко Н.Н., Мельцер Л.И., Романова Е.А., Богоявленский Б.А., Махно В.Д. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 251 с.]
- Kalnina L., Kuske E., Ilze Ozola. 2015. Peat stratigraphy and changes in peat formation during the Holocene in Latvia. *Quaternary International*, 383: 186–195. DOI: 10.1007/978-3-319-04364-7\_179
- Kats N.Ya., Kats S.V., Skobeyeva Ye.I. 1977. *Atlas of plant remains in peat*. Nedra: Moscow, 371 p. (in Russian). [Кац Н.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. 1977. Атлас растительных остатков в торфах. М.: Недра, 1977. 371 с.]
- Kutenkov S.A. 2013. The computer program «Korpi» for the construction of stratigraphic charts of peat composition. *Trans. Karelian Res. Cent. Russ. Acad. Sci.* 6, 171–176 (in Russian). [Кутенков С.А. 2013. Компьютерная программа для построения стратиграфических диаграмм состава торфа "Korpi" // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. № 6. С. 171–176].
- Kutenkov S., Chakov V., Kuptsova V. 2022. Topology, vegetation and stratigraphy of far eastern Aapa mires (Khabarovsk region, Russia). *Land*. 11(1): 96. DOI: 10.3390/land11010096
- Lamentowicz M., Marcisz K., Zielińska M., Kaliszan K., Fiałkiewicz-Kozioł B., Kołaczek P., Słowiński M., Lapshina E., Gilbert D., Buttler A., Jassey V.E.J., Laggoun-Defarge F. 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
- Lapshina E.D. 1987. The structure and dynamics of the floodplain mires of the Ob River (in the south of the Tomsk Province). Abstract dis. cand. biol. sciences. Tomsk, 18 pp. (in Russian). [Лапшина Е.Д. 1987. Структура и динамика болот поймы реки Оби (на юге Томской области): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск. 18 с.]

Lapshina E.D. 1995. The main features of the structure and development of floodplain mires. In: *Memory reading of Yu.A. L'vov*, Tomsk. pp. 52–56 (in Russian). [Лапшина Е.Д. 1995. Основные черты строения и развития пойменных болот // Чтения памяти Ю.А. Львова. Томск: НИИББ при Том. ун-те. С. 52–56].

Lapshina E.D., Zarov E.A. 2023. Stratigraphy of peat deposits and mire development in the south and middle taiga zones 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., Tolpycheva T.Yu., Shvedchikova, N.K. 2001. *Mire systems of Western Siberia and their environmental importance*. Grif i Ko, Tula, 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. 2001. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула : Гриф и К, 584 с.]

Logvinova L.A., Zyкова M.V., Krivoshechekov S.V., Drygunova L.A., Perederina I.A., Golubina O.A., Perminova I.V., Konstantinov A.I., Belousov M.V. 2022. Comparative pharmacognostic study of different origin low woody-grass types peats for substantiation of their use as prospective sources of biologically active humic. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 1: 277–288. (in Russian). [Логвинова Л.А., Зыкова М.В., Кривошеко́в С.В., Дрыгунова Л.А., Передерина И.А., Голубина О.А., Перминова И.В., Константинов А.И., Белоусов М.В. 2022. Сравнительное фармакогностическое исследование низинных древесно-травяных видов торфа различного происхождения для обоснования их использования в качестве перспективных источников биологически активных гуминовых кислот // Химия растительного сырья. №1. С. 277–288.] DOI: 10.14258/jcprpm.20220110663

L'vov Yu.A. 1991. *Swamp resources*. In: Prirodnye resursy Tomskoi oblasti, (Gadzhiev I.M., Zemtsov A.A., eds.), pp. 67–83, Nauka, Sibirskoe otделение, Novosibirsk (in Russian). [Львов Ю.А. 1991. Болотные ресурсы // Природные ресурсы Томской области / под ред. И.М. Гаджиева, А.А. Земцова. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. С. 67–83.]

Maslov S.G., Inisheva L.I., Porokhina E.V. 2023. *Composition of organic matter and microelements of sphagnum peat of the northern part of the Vasyuganskoye deposit and the direction of their use*. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2: 311–318. DOI: 10.14258/jcprpm.20230211764 (in Russian). [Маслов С.Г., Инишева Л.И., Порохина Е.В. 2023. Состав органического вещества и микроэлементов сфагновых торфов северной части месторождения Васюганское и направление их использования // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 311–318.]

Nosova M.B., Lapshina E.D., Notov A.A., Ignatov M.S. 2022. Holocene dynamics of a relict moss complex in the Korotovskoe mire (State Complex "Zavidovo", Russia). *Nature Conservation Research*, 7(1): 80–95. DOI: 10.24189/ncr.2022.010 (In Russian). [Носова М.Б., Лапшина Е.Д., Нотов А.А., Игнатов М.С. 2022. Голоценовая динамика реликтового комплекса мхов Коротовского болота (Государственный комплекс "Завидово", Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2022. Т.7, № 1. С. 80–95.]

Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Mokhova L.M., Chakov V.V., Klimin M.A., Zakharchenko E.N. 2021. The Stratigraphy of the Blanket Peatland and the Development of Environments on Bolshoi Shantar Island in the Late Glacial–Holocene. *Russian Journal of Pacific Geology*. 15(3): 252–267. DOI: 10.1134/S1819714021030064

Schuryakov D. S. 2023. The results of study of botanical composition of peat deposit of the Ishtan swamp massif. In: *Botanika i botaniki v menyayushchetsya mire: Trudy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 135-letiyu kafedry botaniki i 145-letiyu Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, NI TSU, Tomsk, p. 323–329 (in Russian). [Щуряков, Д. С. Результаты исследования ботанического состава торфяной залежи болотного массива Иштан / Д. С. Щуряков // Ботаника и ботаники в меняющемся мире: Труды Международной научной конференции, посвященной 135-летию кафедры ботаники и 145-летию Томского государственного университета, Томск, 14–16 ноября 2023 года. Томск: НИ ТГУ, 2023. С. 323–329.] DOI: 10.17223/978-5-7511-2661-2/75

Sinyutkina A.A. 2020. Estimation of the raised bogs peat deposit transformation of West Siberia south-eastern part. *Geosphere Res.*, 1: 78–87. (in Russian). [Синюткина А. А. 2020. Оценка трансформации торфяной залежи осушенных верховых болот юго-восточной части Западной Сибири // Геосферные исследования. №1. С. 78–87.] DOI: 10.17223/25421379/14/6

Tsyganov A. N., Zarov E.A., Mazei Yu.A., Kulkov M.G., Babeshko K. V., Payne R.J., Ratcliffe J.L., Fatynina Yu.A., Zazovskaya E., Lapshina E.D. 2021. Key periods of peatland development and environmental changes in the middle taiga zone of Western Siberia during the Holocene. *Ambio*. DOI: 10.1007/s13280-021-01545-7

Tyuremnov S.N. 1976. *Peat deposits*. Nedra: Moscow. 488 pp. (In Russian). [Тюремнов С.Н. 1976. Торфяные месторождения. М.: Недра, 1976. 487 с.]

Vincze I., Finsinger W., Jakab G., Braun M., Hubay K., Veres D., Deli T., Szalai Z., Szabó Z., Magyari E. 2019. Paleoclimate reconstruction and mire development in the Eastern Great Hungarian Plain for the last 20,000 years. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 271: 104112. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2019.104112

Поступила в редакцию: 22.07.2024  
Переработанный вариант: 10.03.2025  
Принято в печать: 12.03.2025

## 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 амёб) [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 pH

Показатель pH 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 pH-метра фиксировались после стабилизации. Всего было проанализировано 97 водных экстрактов.

### Визуализация данных

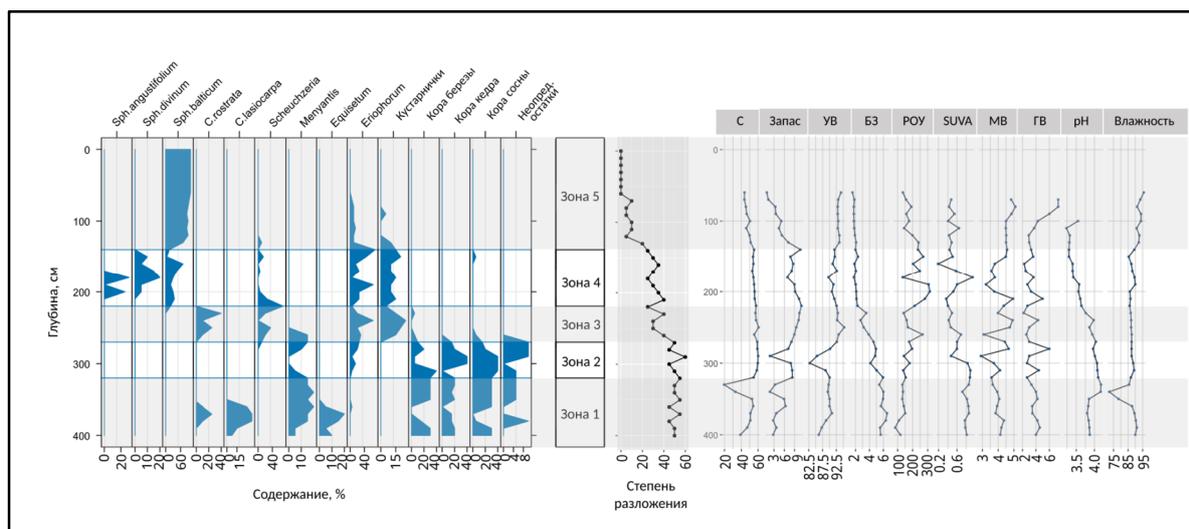
Обработка и визуализация данных была проведена на языке программирования R [R Core Team, 2020] с применением пакета 'ggplot2' [Wickham, 2016] для визуализации данных, 'analogue' [Simpson, Oksanen, 2020] и 'rioja' [Juggins, 2017] для построения стратиграфического профиля торфяной залежи. Стратиграфические 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; pH – 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; pH – 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.

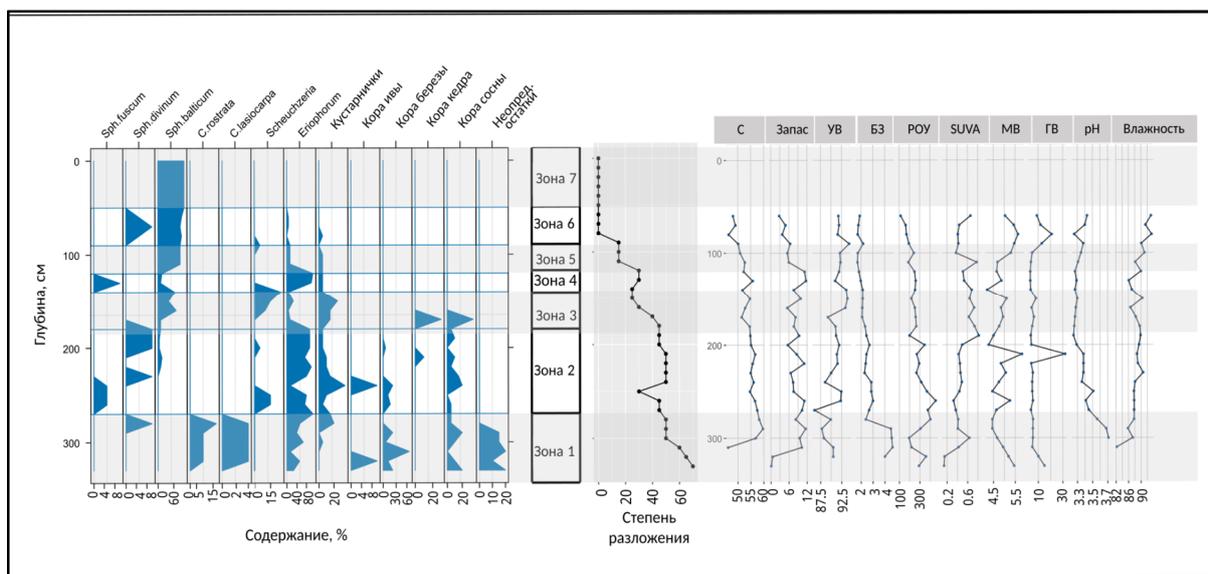
Показатель SUVA<sub>254</sub> с глубиной увеличивался, где максимальный пик (0.9) зафиксирован на глубинах 160-180 см. Минимальное значение 0.2 наблюдалось на глубине 150-160 см. На глубинах 280-400 см было отмечено повышение значений показателя с 0.5 до  $0.8 \pm 0.1$ .

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.

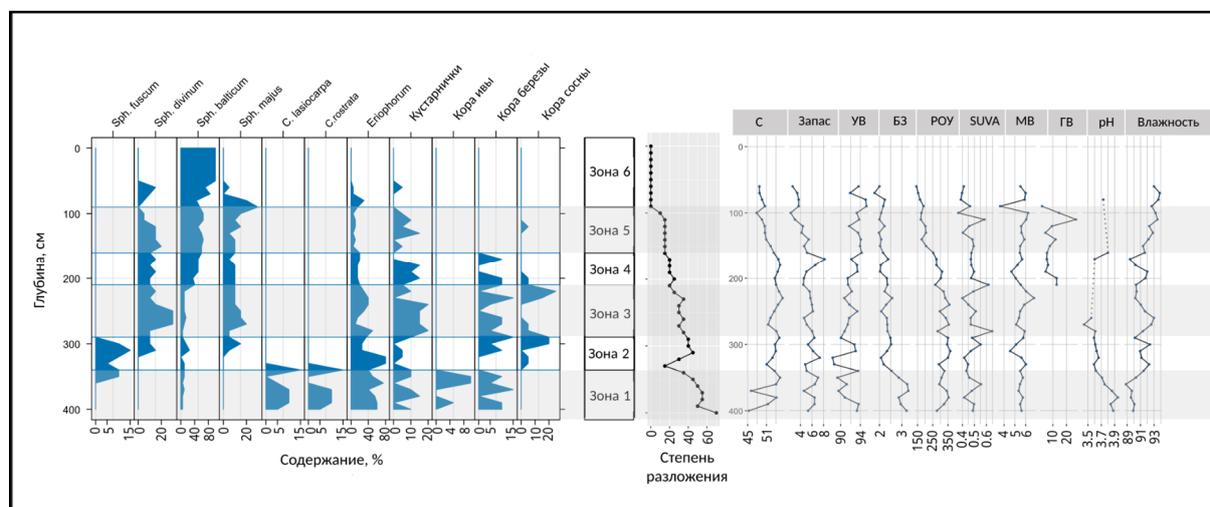
Показатель SUVA<sub>254</sub> имел максимальные значения 0.38÷0.82 на глубинах 100-200 см. Снижение значений приходилось на глубины 210-350 см, и минимальные значения  $0.2 \pm 0.1$  были обнаружены на глубинах 320-330 см.

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
рН	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 [Shanuyova, 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 L.F. 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

Olefelt 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

# HOLOCENE ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN THE WESTERN PART OF EASTERN SAYAN LOW-MOUNTAIN RELIEF: BASED ON COMPREHENSIVE STUDY OF THE MINA MIRE DEPOSITS

*Grenaderova A.V.\* , Sharafutdinov R.A., Mitev A.R., Mikhailova A.B.*

*Институт экологии и географии, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

\* grenaderova-anna@mail.ru

**Citation:** Grenaderova A.V., Sharafutdinov R.A., Mitev A.R., Mikhailova A.B. 2025. Holocene environmental conditions in the Western part of Eastern Sayan low-mountain relief: based on comprehensive study of the Mina mire deposits. *Environmental dynamics and global climate change*. 16(1): 33–48.

**DOI:** 10.18822/edgcc678544

Приводятся результаты палеоэкологической реконструкции для низкогорья западной части Восточного Саяна за последние 7.9 тыс. календарных лет, полученные на основе радиоуглеродного AMS-датирования, спорово-пыльцевого, ботанического анализа и анализа макрочастиц угля торфяных отложений в бассейне р. Мина (правобережье р. Енисей). Установлено, что в период усиления аридизации 7.9-5.7 тыс. кал. л. н. в среднем течении р. Мина на участке с широкой поймой складывались условия для отшнуровывания старицы с постепенным ее заилением, зарастанием и заболачиванием. На склонах Кутурчинского и Койского Белогорья в это время были развиты пихтово-елово-кедровые леса, часто случались пожары. Откликом на термический оптимум голоцена можно считать снижение обводненности поймы и начало торфонакопления, усиление пожарной активности. Стабильным увлажнением отличался период 5.3-4.1 тыс. кал. л. н., когда по склонам произрастали пихтово-елово-кедровые разнотравно-папоротниковые леса. На основе анализа макрочастиц угля выделено три этапа усиления пожарной активности: I – 6800-5400 кал. л. н., II – 4600-3200 кал. л. н. (пожарные эпизоды около 4300 и 3400 кал. л. н. отличаются максимальным пиковым значением скорости аккумуляции угля), III – 1800 кал. л. н. – по настоящее время, последний этап характеризуется наименьшими межпожарными интервалами (около 200-400 лет). На даты 7500, 6200, 5250, 2200 и 1100 кал. л. н. пришлись пожарные события со скоростью аккумуляции угля, не превышающей пороговое значение. Снижение общей увлажненности в период 4.1-3.3 тыс. кал. л. н. способствовало высокой пожарной активности, повлекшей увеличение освещенности территории и усиление развития растений нижних ярусов – кустарников и трав. Начиная с 2.4 тыс. кал. л. н. в пыльцевом спектре нарастает содержание пыльцы темнохвойных видов, болото переходит с евтрофно-мезотрофной стадии развития на мезотрофную, что совпадает со значительным уменьшением величины солнечной инсоляции для 55° с. ш. После 1200 кал. л. н. на суходолах развиты пихтово-елово-кедровые леса в условиях стабильного увлажнения, пойменное болото перешло на мезотрофно-олиготрофную стадию развития. Временной интервал 700-600 кал. л. н. отличается снижением доли хвойных растений, основу спорово-пыльцевого спектра составляют *Betula sect. Nanae*, сем. Ericaceae и род *Sphagnum*, низкая пыльцевая продуктивность древесных отмечена и около 450-400 кал. л. н., что может отражать похолодание Малого ледникового периода. Последние 150-200 лет фиксируется сокращение доли *Pinus sibirica* и увеличение содержания *Pinus sylvestris* в составе древостоя, что в совокупности со стабильно высоким содержанием макроугля отражает нарастающую континентальность климата.

**Ключевые слова:** реконструкция растительности и климата, голоцен, торфяные отложения, пожары, низкогорье, Восточный Саян.

Mires in the foothill areas have high palaeoecological information content. Pollen and spores, which record composition and abundance changes of the main forest-forming species' pollen in combination with pollen of shrubs and grasses, make it possible to trace altitudinal shifts in vegetation belts caused by relative warming or cooling [Blyakharchuk, 2011; Borisova, Panin, 2019; Blyakharchuk & Kurina, 2021; Bezrukova et al., 2022]. The feature of peat strata to retain various organogenic and mineral fractions that fall on their surface as a result of deluvial and river runoff [Volkova, 2005; Chernova, 2005] makes it possible to identify periods of increased erosion, including those of a pyrogenic factor. To date, within the Altai-Sayan region, the features of palaeoecological conditions in the western part of the Eastern Sayan have been less studied. To understand the main trends in the development of mountain taiga landscapes in specific physical-geographical, climatic and forest growth conditions, a comprehensive study of peat deposits seems extremely important.

The study site is located on the north-western macroslope of the Eastern Sayan in the floodplain of the Mina River (right bank of the Yenisei River). The river valley lies between the slopes of the Kuturchinsky and Koysky Belogorye, north of the Manskoye Belogorye ridge (the western end of the main watershed ridge of the Eastern Sayan), and belongs to the northern part of the Mansko-Kansky low-mountain region. The mires are confined to the widest sections of the Mana and Mina rivers valleys. At the river mouth of the Mina the terrace part is swampy; in the high-mountain belt, small areas of mires are confined mainly to the shores of overgrown lakes. The studied mire area is located on the right bank of the Mina River in the middle reaches above the mouth of the left-bank tributary of the Kuturchin River. The modern mire vegetation cover is represented by a mixed sparse forb-sphagnum-green moss forested mire.

Using botanical analysis of peat, three columns were studied: 1) in a terrace depression at a point with coordinates 54.92° N, 94.28° E and an absolute mark of 560 m, where the thickness of the deposits was 2.40 m, of which: peat - 2.05 m, peaty loam - 0.35 m; 2) at a distance of 450 m from the slope depression, the total thickness is 1.95 m, of which 1.25 m is peat, 0.7 m is loam; 3) at a distance of 750 m from the slope, where peat is 0.8 m, below there is gravel.

Samples of the thickest column were studied using a combination of methods: pollen [Grichuk, Zaklinskaya, 1948], botanical analysis [Kulikova, 1974], macrocharcoal analysis [Clark, 1988], determination of peat ash content was carried out according to [GOST 11306-2013, 2019]. AMS dating was performed in Poznań Radiocarbon Laboratory, Poland.

Peaty loam (depth interval 2.40–2.05 m, 7900–5700 cal. yr BP) includes remains of the bark of *Picea obovata* and *Pinus sibirica*, as well as tissues of green and sphagnum moss. The peat core has a two-layer structure; in the interval of 2.05–1.35 m, the deposit is formed by lowland woody-sphagnum peat, with ash content values varying from 15 to 30%, except for the depth interval of 1.87–1.81 m (4500–4100 cal. yr BP), where the maximum value of 53% is observed. A sample from this stratigraphic layer was separated in an aqueous medium with subsequent examination of the fine and medium-dispersed phase using a TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope with an OxfordX-Act energy-dispersive microanalysis system. The content of Si (6%) and Al (2.2%) indicates a high proportion of terrigenous admixture in the formation of the stratigraphic layer, likely associated with post-pyrogenic erosion in the study area. The upper part of the core (1.35–0.07 m, approximately from 1100 to 60 cal. yr BP) is formed by sphagnum peat.

Starting from 7970±23 cal.yr BP on the Kuturchinsky and Koysky Belogorye slopes fir-spruce-siberian pine forests grew. In the Mina River valley with a wide floodplain conditions developed for the pinching off of an oxbow lake with its gradual silting and overgrowing. The time interval of 7200–5700 cal. yr BP was characterized by high fire activity and the beginning of peat accumulation in the Mina River floodplain (around 5700 cal. yr BP), which may reflect the response of landscapes to the Holocene Thermal Maximum.

The period 5300–4100 cal. yr BP is characterized by consistently high humidity, with slopes covered by fir-spruce-cedar forests and a forb-fern ground cover. The time interval 4500–4100 cal. yr BP is characterized by the passage of strong fires and increased surface erosion, which contributed to a high input of mineral particles to the surface of the mire, which together may reflect the manifestation of pyrogenic erosion.

Starting from 4100 cal. yr BP, a significant reduction in the amount of dark coniferous species pollen is noted (up to 40–44% in total): *Pinus sibirica* – 25–27%, *Picea* – 5–8%, with a slight increase in the content of *Abies* pollen (up to 7–9%) and *Betula* sect. *Nanae* (up to 18–23%). The total content of grass pollen increases to 20%, representatives of the following taxons are noted: Rosaceae, Caryophyllaceae, Poaceae, *Artemisia*, *Thalictrum*. In the mire the spruce-sphagnum community is replaced by green moss-sphagnum yernik. This period is marked by the maximum extremum in the content of macrocharcoals indicating the close localization of the fire to the study point. The totality of the identified paleosignals may indicate a decrease in overall humidity in the period 4100–3300 cal. yr BP and high fire activity. The increase in fire activity during this period is in good agreement with the Subboreal Thermal Maximum of the Holocene (from 4200 to 3200 cal. yr BP), which was identified by N.A. Khotinsky [Khotinsky, 1982] for Northern Eurasia, or on a global scale with “event 4.2” (4.2–3.8 thousand cal. yr BP) [Mayewski et al., 2004; Wang et al., 2010].

The cooling period around 2600 cal. yr BP, known for the temperate latitudes of the Northern Hemisphere [Shnitnikov, 1957], was also noted in the highlands of the Eastern Sayan [Bezrukova et al., 2004], in Altai [Galakhov et al., 2012], and in the Baikal region [Vorobyeva, 2010]. In the Mina core, this period was manifested by an increase in the amount of *Betula* sect. *Nanae* (up to 25% in the pollen sum), a high content of *Equisetum* (16% of the proportion of spores), and a complete absence of traces of macrocharcoal.

Beginning at 2400 cal. yr BP, the pollen content of dark coniferous species. In the range of 2400–2000 cal. yr BP the content of spruce is noted – up to 13.6%, which may indicate a wide distribution of *Picea* and a consistently high soil moisture content. At the same time, sphagnum moss dominates in the ground cover of the mire. *Sphagnum angustifolium* dominates, the tree layer is absent, the mire passes from the eutrophic-mesotrophic stage of development to the mesotrophic-oligotrophic one, which coincides with a significant decrease in the amount of solar insolation [Berger, Loutre, 1991], for 55° N approximately to 480–490 Wm<sup>-2</sup>.

Fires occurred 1550, 1100 and 900 cal.yr BP which in the observations may reflect a change in humidification conditions towards lower humidity. In general, the interval 1600-1100 cal.yr BP correlates well with the Cooling of the Dark Ages (410-775 AD).

The interval 1100-900 cal. yr BP is characterized by a peak value of dark coniferous species (68-73%– the maximum extremum for the entire reconstruction period), the participation of *Pinus sibirica* – 50-52%, *Picea* – up to 11%, *Abies* – up to 12%. This period is consistent with the Medieval Warm Period, which covered significant areas of the Northern Hemisphere from approximately 830 to 1100 AD [PAGES 2k Consortium, 2013; Moberg et al., 2005].

The most dramatic changes in vegetation composition occurred during the period 750–650 cal. yr BP: pollen concentration was extremely low, the contribution of conifers to the pollen sum was minimal, and the majority consisted of *Betula* sect. *Nanae* grains (over 65%), *Ericaceae* pollen, and *Sphagnum* spores.

In the interval of 600-500 cal. yr BP stable humid conditions are recorded, fir-spruce- siberianpine forests are developed. Later, around 500–450 cal. yr BP, a high proportion of Siberian pine in the forest composition is noted (41% of the pollen sum), with a decrease in the proportion of other dark coniferous species (up to 4–7%), a reduction in spore content to 20%, and a maximum of *Ericaceae* and *Artemisia* in the grass and shrub group, which may reflect increased continentality.

Further, at 450–400 cal. yr BP, while Siberian pine remained dominant, relatively low pollen productivity was noted. It is known that 1600-1826 AD became the coldest period of the Little Ice Age.

Later, consistently humid and cool conditions were observed in the study area, with fir-spruce-Siberian pine forests continuing to develop on the slopes. At the final stage, an increase in the pollen content of *Pinus sylvestris* (up to 13%) and a decrease in the proportion of *Pinus sibirica* (up to 27%) were recorded. The content of macrocharcoal in peat has remained consistently high over the past 1000 years, reflecting the increasing intensity of fires characteristic of the entire Northern Hemisphere [Goldammer et al., 2013; Valendik et al., 2014; Ponomarev, Haruk V.I., 2016].

**Key words:** vegetation and climate reconstruction, Holocene, peat deposits, fires, low-mountain relief, Eastern Sayan.

## ВВЕДЕНИЕ

Бореальные леса занимают значительную территорию нашей страны и играют чрезвычайно важную роль в поддержании экологического равновесия на Земле, в том числе в поглощении и связывании углерода, в смягчении глобальных изменений климата [The Boreal Forest, 2020]. В настоящее время для понимания основных тенденций развития таежных ландшафтов в условиях меняющегося климата представляется чрезвычайно важным изучение ретроспективного отклика лесных экосистем в конкретных физико-географических условиях.

Хорошей палеоэкологической информативностью обладают болотные отложения. Оценить изменение структуры леса и смещение высотных границ растительных поясов в ответ на потепление или похолодание климата позволяет анализ фоссилизированных в болоте спорово-пыльцевых спектров [Blyakharchuk, 2011; Borisova, Panin, 2019; Blyakharchuk & Kurina, 2021; Bezrukova et al., 2022]. Способность торфяных толщ удерживать различные органогенные и минеральные фракции, попадающие на их поверхность, дает возможность выделять периоды усиления делювиального и речного стока [Volkova, 2005; Chernova, 2005], этапы активизации эрозии, в том числе и пирогенной природы.

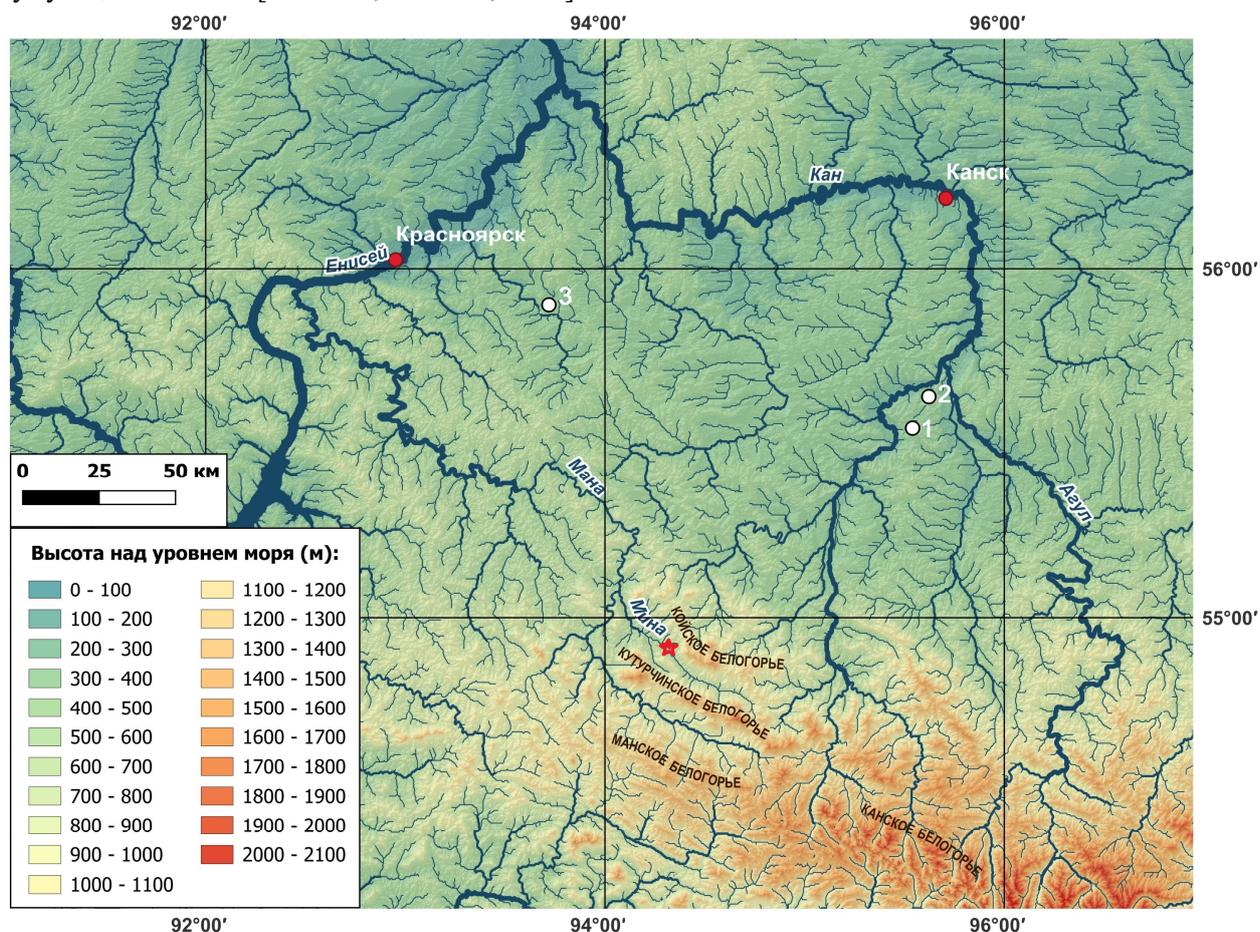
Объектом настоящего исследования являются торфяные отложения, расположенные на северо-западном макросклоне Восточного Саяна в пределах Манско-Канского лесорастительного округа Восточно-Саянской провинции Алтае-Саянской горной области [Korotkov, 1994]. Леса Манско-Канского района низких гор по целевому назначению относятся к эксплуатационным и защитным примерно в равной степени [Draft forest plan, 2018]. Они имеют большое значение для поддержания гидрологического режима крупных правобережных притоков р. Енисей, таких как р. Мана и р. Кан.

Цель работы заключается в реконструкции отклика ландшафтов в Манско-Канском районе низких гор на масштабные изменения климата в голоцене. Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи: реконструировать динамику растительных сообществ в низкогорье Восточного Саяна; восстановить динамику пожарного режима и выделить интервалы усиления пожарной активности в окрестностях болота; сопоставить полученные данные с известными глобальными климатическими тенденциями.

## ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования располагается на северо-западном макросклоне Восточного Саяна, в пойме р. Мина. Долина реки Мина залегает между склонами Кутурчинского и Койского Белогорья, севернее хребта Манское Белогорье. Последний совместно с хребтом Канское Белогорье образует западную оконечность главного водораздельного хребта Восточного Саяна. Рельеф выположенный, хребты характеризуются уплощенными широкими вершинами и пологими склонами, ориентированы параллельно главному хребту с юго-востока на северо-запад [Nikolaev, Chernov, 1988].

Река Мина является крупным правобережным притоком р. Мана, бассейн которой занимает значительную площадь северной части Манско-Канского района низких гор (рис. 1). Район характеризуется сочетанием максимальной для Восточного Саяна густоты водотоков – 0.68-0.7 км/км<sup>2</sup> и минимальной величины падения русла – 2.3 м/км. Длинные (до 3 км) участки врезания русла в коренные породы чередуются с участками меандрирования, в пределах которых происходит аккумуляция аллювия [Nikolaev, Chernov, 1988].



**Рис. 1.** Месторасположение района исследования, звездочка – точка отбора торфяной колонки «Мина»; положение ближайших изученных торфяных разрезов: 1 – болото Большое [Grenaderova et al., 2024a], 2 – болото Сосновка [Grenaderova et al., 2024b], 3 – болото Пинчинское (Mikhailova et al., 2021). Карта построена с помощью геоинформационной системы QGIS 3.32.3-Lima.

**Fig. 1.** Location of the study area, the asterisk indicates the sampling point of the Mina peat core; location of the nearest studied peat sections: 1 – Bolshoe mire [Grenaderova et al., 2024a], 2 – Sosnovka mire [Grenaderova et al., 2024b], 3 – Pinchinskoye mire (Mikhailova et al., 2021). The map was created using the QGIS 3.32.3-Lima geographic information system.

На правобережье р. Мина водосбор ограничен высотами склонов южной и юго-западной экспозиции Койского Белогорья. Они достигают в среднем отметки 1350-1250 м в верховье реки, 1200-1000 м (отдельные вершины до 1469 м, 1518 м, Голец Кирельский – 1733 м) в среднем течении и 1300-1000 м – в нижнем течении реки. На левобережье водосбор р. Мина представлен склонами

северо-восточной экспозиции Кутурчинского Белогорья с преобладающими абсолютными отметками около 1400 м (отдельные вершины на водоразделе достигают 1637 м, 1643 м, 1765 м, 1876 м). Исток Мины находится на высоте 1240 м. Высота уреза реки на приустьевом участке, в месте впадения р. Мина в р. Мана, составляет 490 м.

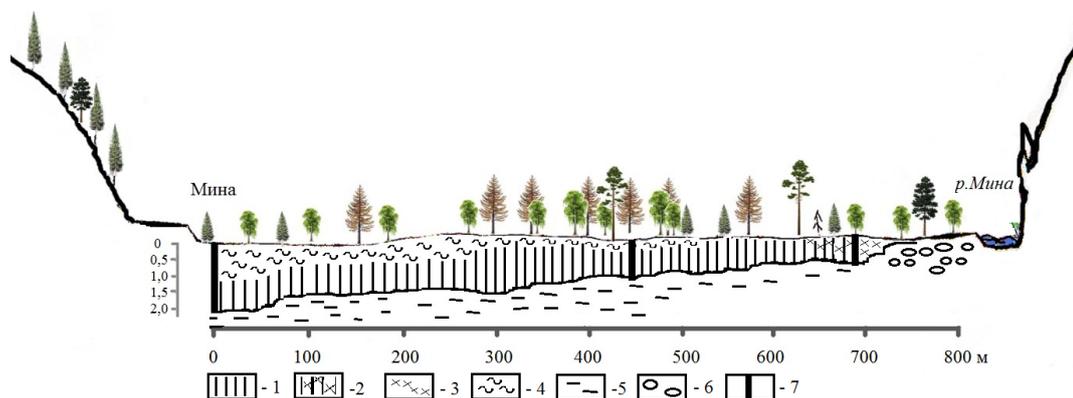
Климат района резко континентальный, умеренно прохладный, с продолжительной и суровой зимой, с неустойчивой прохладной погодой летом, в течение которого выпадает основная масса осадков. На высотах 900-1300 м средняя температура января колеблется от -17 до -25°C, июля – от 12 до 14°C. Распределение осадков находится в тесной зависимости от ориентации горных склонов: на западных и юго-западных склонах, открытых в сторону влажных воздушных потоков, их выпадает до 800 мм и более в год, в северных предгорьях – до 400 мм [Parmuzin, 1964]. Температурный максимум колеблется от +6°C в январе и до +38°C в июле [Krasnoborov, 1963].

Основными типами ландшафтов Восточного Саяна являются горно-таёжные и высокогорные [Mikhailov, 1961]. Преобладают елово-кедрово-пихтовые леса на горных таёжных слабоподзолистых светлых глубоковыщелоченных почвах [Parmuzin, 1964]. Верхняя граница леса в Кутурчинском Белогорье проходит на высоте 1450-1600 м, светлохвойные леса поднимаются до отметки 900 м [Krasnoborov, 1963]. В высокогорье наблюдается сочетание черт альпийской и гольцовой растительности. Небольшие участки болот в основном занимают берега зарастающих озёр.

Болотная растительность приурочена к наиболее широким отрезкам речных долин и приустьевым участкам в предгорье и низкогорье. Возраст болот в долинах рек с водосбором на северном макросклоне западной части Восточного Саяна не превышает 6000 кал. л. н. [Rodionova, Grenaderova, 2016, 2018; Grenaderova et al., 2024a]. Наиболее древние из известных торфяных толщ перирогенной области Восточного Саяна и Сибирской платформы, расположенные в южной части Рыбинской впадины (самой крайней северо-восточной межгорной впадины Саяно-Алтайской складчатой области) [Nikolaev, Chernov, 1988], имеют возраст 8500-7000 кал. л. н. [Mikhailova et al., 2021; Grenaderova et al., 2024b] и залегают на старичных (озерных) суглинках различной мощности.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемое болото находится в среднем течении реки Мина, выше устья её левобережного притока р. Кутурчин. Долина р. Мина здесь асимметрична, поперечный профиль ящикообразный. Ширина правобережной заболоченной поймы достигает 800 м, уступ поймы возвышается на 0.7 м над урезом реки. Русло шириной 10-15 м, глубина – 0.6-0.8 м, скорость течения воды – 1.3 м/с. Левый берег представлен скальным склоном Кутурчинского Белогорья с крутизной более 45° (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема поперечного профиля болота в пойме р. Мина.

Торф: 1 – древесный, 2 – древесно-хвощевой, 3 – хвощевой, 4 – сфагновый, 5 – суглинок, 6 – галечник, 7 – колонки отбора на детальный ботанический анализ торфа.

**Fig. 2.** Cross-sectional diagram of a mire in the Mina River floodplain. Peat: 1 – wood, 2 – wood-horsetail, 3 – horsetail, 4 – sphagnum, 5 – loam, 6 – gravel, 7 – sampling columns for detailed botanical analysis of peat.

Современный растительный покров представлен смешанным редкостойным разнотравно-сфагново-зеленомошным облесенным болотом. В притеррасной части болота древесный ярус образован *Picea obovata* Ledeb., *Betula pubescens* Ehrh., из кустарников отмечены *Betula* sect. *Nanae*, *Rhododendron palustre* L., кустарничковый ярус представлен *Oxycoccus palustris* Pers., в моховом покрове преобладает зеленый мох (*Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegn., *Pleurozium shreberi* (Brid.) Mitt, *Calliergonella cuspidata* (Hedw.) Loeske. По направлению к урезу реки (в 100 м от склона) наблюдается выпадение ели из древесного яруса, здесь и далее высота березы не превышает 3-4 м, напочвенный покров образует разнотравно-осоково-сфагновое сообщество с клюквой. В центральной части болота (380-700 м от склона) в древесном ярусе появляется *Pinus sylvestris* L., *Larix sibirica* Ledeb., присутствуют *Picea obovata*, *Betula pubescens*, травяно-кустарничковый ярус представлен: *Vaccinium vitis-idaea* L., *Oxycoccus palustris*, *Carex cespitosa* L., *Carex rostrata* Stokes., *Eriophorum*, *Lycopodium* sp., моховой покров слагают *Sphagnum angustifolium* C. Jens., *Sph. fuscum* (Schimp.) Klinggr., *Sph. divinum* Flatberg & K. Hassel, *Sph. teres* (Schimp.) Ångstr., *Sph. cuspidatum* Ehrh. ex Hoffm., *Sph. squarrosum* Crome, *Sph. rubellum* Wils., *Sph. warnstorffii* Russow. Ближе к урезу реки в составе древесного яруса преобладают береза и сосна сибирская (*Pinus sibirica* DuTour.), отмечены багульник, клюква, брусника, в моховом покрове доминирует зеленый мох (*Pleurozium schreberi*, *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, *Dicranum bonjeanii* De Not., *Polytrichum commune* Hedw., *Calliergonella cuspidate*, *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al., *Ptilium* sp., *Drepanocladus* sp.). У реки произрастает березняк осоково-разнотравный с лиственницей и елью, почва аллювиально-серогумусовая глееватая легкосуглинистая.

Мощность торфа снижается по направлению от присклонового понижения к урезу. Вблизи склона максимальная мощность торфа достигает 2.05 м, в центральной части снижается до 1.25 м, а в 50 м от реки составляет 0.8 м, постепенно сходя на нет.

Отбор болотных отложений из трех колонок проводился с помощью пробоотборника Eijkelkamp Peat sampler. Опробование выполнено с шагом в 5-8 см. Первая колонка расположена в притеррасном понижении в точке с координатами 54.92° с.ш. и 94.28° в.д. (абсолютная отметка 560 м) и имеет мощность 2.40 м, из них: торф – 2.05 м, оторфованный суглинок – 0.35 м. Вторая колонка отобрана на расстоянии 450 м от присклонового понижения, общая мощность достигает 1.95 м, из них: 1.25 м – торф, 0.7 м – суглинок. Третья колонка заложена ближе к урезу реки, мощность торфа – 0.8 м, ниже галечник (рис. 2).

Образцы первой колонки изучены комплексом методов: спорово-пыльцевой [Grichuk, Zaklinskaya, 1948], ботанический [Kulikova, 1974], палеоантракологический анализ [Clark, 1988], определение зольности торфа проведено согласно [GOST 11306-2013, 2019]. Минералы из высокозольной прослойки торфа (1.87-1.81 м) изучены методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного микроанализа OxfordX-Act. AMS-датирование выполнено в Poznań Radiocarbon Laboratory, Польша. Радиоуглеродный возраст в интервале глубин 2.30-2.35 м составил 7135±35 <sup>14</sup>C (Poz-119029), 1.35-1.40 м – 1190±30 <sup>14</sup>C (Poz-119028). Калибрование и построение глубинно-возрастной модели осуществлено в программе R [R CoreTeam, 2013] с использованием пакета «clam» [Blaaauw, 2010]. Калиброванный возраст в интервале глубин 2.30-2.35 м составил 7970±23 кал. л. н., а для интервала 1.35-1.40 м – 1121±42 кал. л. н.

Лабораторная подготовка образцов для спорово-пыльцевого анализа проводилась по методике [Moore et al., 1991] с применением HCl и NaOH, в модификации без проведения ацетализа и обработки тяжелой жидкостью. Промывание образцов выполнено через сито 250 мкм. Обработке подвергались пробы объемом 1 мл, таблетки со спорами *Lycopodium* для подсчета концентрации пыльцы не применялись. Анализ проводился на микроскопе «Микромед-3» при увеличении ×400, с использованием определителей [Kurgijanova, Aleshina, 1972, 1978; Veug, 2004]. Для каждого образца подсчитывалось не менее 300-350 пыльцевых зерен древесных и травянистых в сумме. На спорово-пыльцевой диаграмме (рис. 3) обилие пыльцы травянистых (NAP) и древесных (AP) выражено в процентах от их суммы (пыльца представителей сем. Сурегасеае исключена из расчета), обилие споровых посчитано отдельно. Для выделения спорово-пыльцевых зон применялся метод broken stick model [MacArthur, 1957] в программе R пакетах 'vegan', 'rioja' и 'analogue'.

При подготовке к ботаническому анализу пробы торфа кипятили в течение 10 минут в 10%-ном растворе NaOH, промывали под струей горячей воды через сито с диаметром ячейки 250 мкм [Largin, 1977]. Микроскопирование осуществлялось при помощи светового микроскопа «Микромед-3» при

увеличении  $\times 200$ . Для определения видовой принадлежности растительных остатков использовались атласы [Dombrovskaya et al., 1959; Кас et al., 1977].

Для анализа макрочастиц угля из каждого интервала была отобрана осредненная проба объёмом  $1 \text{ см}^3$ . Лабораторный этап включал в себя пробоподготовку по стандартной методике [Clark, 1988] с предварительной обработкой 5%-ным раствором пиродифосфата натрия ( $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ) и 6%-й перекисью водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Подсчет частиц угля проведен при увеличении  $\times 20$ , учитывались все частицы крупнее  $125 \text{ мкм}$ . Выявленное количество угольков в каждом интервале и полученный с помощью калибровочной кривой интерполированный возраст были введены в качестве исходных параметров в программу CharAnalysis [Higuera, 2009]. В исходном файле обработки данных применены следующие значения: для интерполяции использовался временной отрезок 10 лет; метод сглаживания данных – функция локальной взвешенной регрессии с робастными весами (Robust LOWESS) со сглаживающим интервалом в 500 лет; тип пороговых значений – локальный; вероятность, при которой отсекаются минимальные значения CHAR, – 0.05; временной интервал, использовавшийся для сглаживания данных расчёта межпожарных интервалов, – 1000 лет.

Полученные схемы демонстрируют скорость аккумуляции макрокопических частиц угля (CHAR), локальные пожарные эпизоды и интервалы повторения пожаров в заданном временном отрезке (рис. 4). Локальный пожарный эпизод (“+”) отражает первичное отложение древесного угля от пожара и/или серии пожаров, находящихся в радиусе от нескольких десятков-сотен метров [Clark et al., 1998] до 3 км [Higuera, 2009] от объекта исследования.

Графическое отображение результатов выполнено при помощи программ C2 (распределение макрофоссилий растений, пыльцы и спор) [Juggins, 2003].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Анализ макрофоссилий и зольность торфа

Оторфованный суглинок (интервал глубин 2.40 – 2.05 м, 7.9-5.7 тыс. кал. л. н.) включает остатки коры *Picea obovata* и *Pinus sibirica*, ткани зеленого и сфагнового мха (рис. 3).

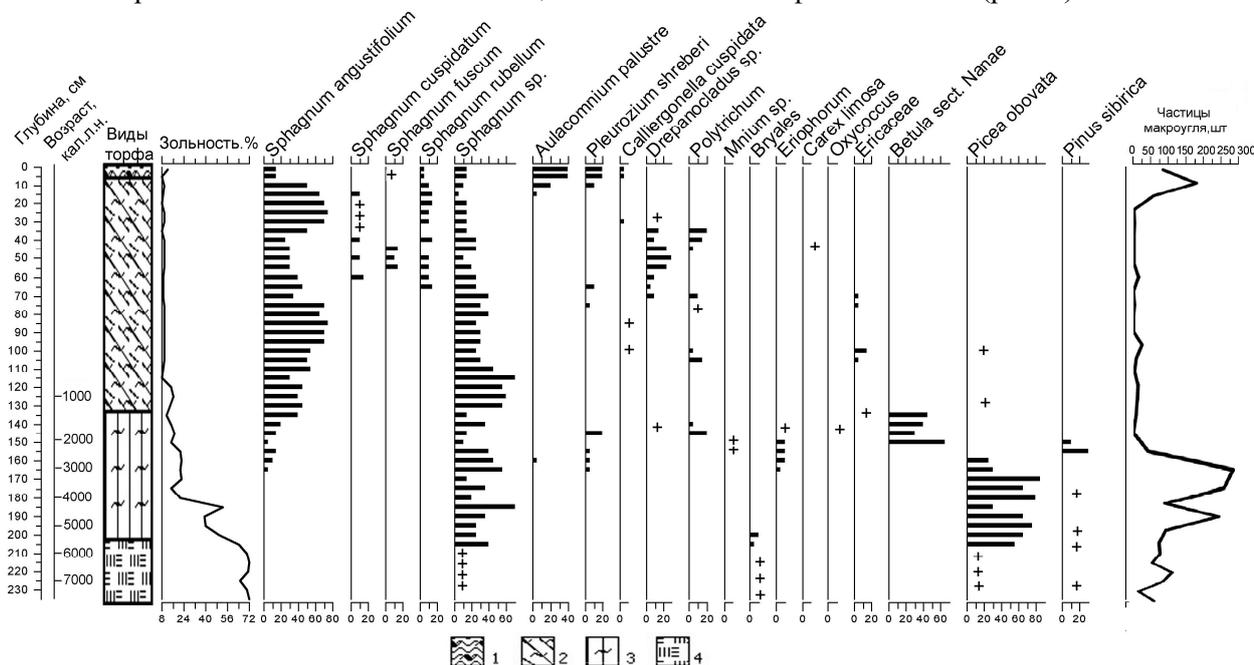


Рис. 3. Виды торфа и основные растения-торфообразователи из отложений болота Мина, зольность торфа и содержание частиц макроугля, шт./см<sup>3</sup>

Торф: 1 – гипновый, 2 – сфагновый переходный, 3 – древесно-сфагновый низинный, 4 – оторфованный суглинок.

Fig. 3. Types of peat and main peat-forming plants from the Mina mire deposits, ash content of peat and content of macrocharcoal particles, pcs./cm<sup>3</sup>

Peat: 1 – hyprnum, 2 – sphagnum transitional, 3 – woody-sphagnum lowland, 4 – peaty loam.

Торфяная толща имеет двуслойное сложение. В интервале 2.05-1.35 м залежь образована низинным древесно-сфагновым торфом. Значение зольности варьирует от 15 до 30%, за исключением интервала глубин 1.87-1.81 м (4.5-4.1 тыс. кал. л. н), где наблюдается максимум – 53%. Проба из данного стратиграфического слоя подвергнута сепарации в водной среде с последующим исследованием мелко- и среднедисперсной фракции с применением сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного микроанализа OxfordX-Act. Микроанализ позволил выявить присутствие в пробе зерен пирита размером 0.5-2.5 мкм, формирующие шаровидные агрегаты, новообразования барита, а также неидентифицированные в минералогическом отношении фосфаты кальция. В большом количестве представлена терригенная компонента – кристаллы циркона размером до 60 мкм (рис. 4 А), кварца, ортоклаза, альбита различного размера, вплоть до 180 мкм. В пробе отмечены остатки древесины со вскрытыми и истонченными в результате пиролиза клеточными стенками (толщиной 0.8-1.1 мкм) размером до 600 мкм. Поверхности углистых остатков покрыты угловатыми частицами алюмосиликатов размером от 2 до 100 мкм, слабо отделяемых в водной суспензии ультразвуком (рис. 4 Б). Содержание Si (6%) и Al (2.2%) указывает на высокую долю терригенной примеси в формировании стратиграфического слоя, что было связано, вероятно, с развитием постпирогенной эрозии на исследуемой территории.

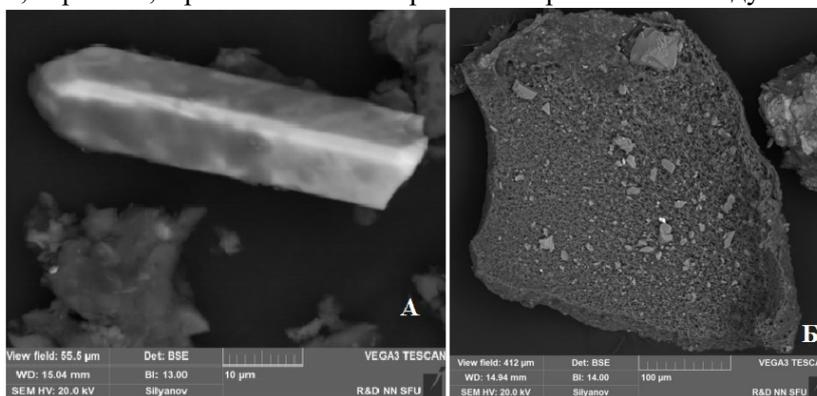


Рис. 4. Микрофотография пробы из интервала 1.87-1.81 м (4.5-4.1 тыс. кал. л. н.).

А – кристалл циркона размером 55 мкм, Б – частица обугленной древесины. Определение выполнено при помощи системы энергодисперсионного микроанализа OxfordX-Act, входящего в состав сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH в R&D центре «Норникель» СФУ.

**Fig. 4.** Micrograph of a sample from the interval of 1.87-1.81 m (4.5-4.1 thousand cal. years ago). A – zircon crystal 55  $\mu\text{m}$  in size, B – particle of charred wood. The determination was made using the OxfordX-Act energy-dispersive microanalysis system, which is part of the TESCAN VEGA 3 SBH scanning electron microscope in the R&D center of Norilsk Nickel SFU.

Верхняя часть толщи (1.35-0.07 м, примерно от 1.1 тыс. кал. л. н. до 60 кал. л. н.) образована сфагновым торфом переходного типа, включает ткани *Sphagnum angustifolium*, *Sph. cuspidatum*, *Sph. fuscum*, *Sph. rubellum*, значения зольности варьируют от 7 до 16%. Слой 0.07-0.00 м представлен гипновым торфом (*Aulacomnium palustre*, *Pleurozium shreberi*, *Calliergonella cuspidata*).

### Спорово-пыльцевой анализ

Палинозона 1 (2.40-2.00 м; 7.9-5.3 тыс. кал. л. н.) отличается относительно низким содержанием пыльцы и спор. В общем составе пыльцевого спектра (без учета пыльцы осоковых) преобладает пыльца древесных растений. Доминирует *Pinus sibirica*, содержание пыльцы варьирует в пределах 21-34%, доля *Picea* составляет 5-12%, *Abies* – 3-6%, *Pinus sylvestris* – до 12%, *Betula sect. Nanae* в среднем – 15%. Участие пыльцы травянистых растений в сумме не превышает 10%. Отмечены пыльцевые зерна представителей семейств Rosaceae, Ericaceae, Asteraceae, Chenopodiaceae, Cyperaceae, рода *Artemisia* и *Thalictrum*. Среди споровых преобладает *Sphagnum*, обильно Polypodiaceae.

Палинозона 2 (2.00-1.55 м; 5.3-2.4 тыс. кал. л. н.). Содержание пыльцы древесных растений варьирует от 80 до 90% от общего состава пыльцевых зерен. Доминирующее положение занимает *Pinus sibirica* (25-49%), *Picea* (5-12%), *Abies* (4-9%), *Pinus sylvestris* (до 6%), *Betula sect. Nanae* (9-

25%). Среди пыльцы мелколиственных растений в небольшом количестве присутствует пыльца *Duschekia*. Доля пыльцы травянистых растений варьирует от 11 до 20% с максимумом (20%) в интервале глубин 1.74-1.68 м (3.7-3.3 тыс. кал. л. н.). Среди них высока доля *Artemisia* и *Rosaceae* (до 7% каждый). Отмечены представители семейств *Ericaceae*, *Ranunculaceae*, *Apiaceae*, *Poaceae*, родов *Polemonium*, *Thalictrum*. Единично фиксируется пыльца семейств *Caryophyllaceae* и *Asteraceae*. В группе споровых растений доминирует *Sphagnum*. Зона отличается наибольшим обилием *Bryales* до 35%, *Polypodiaceae* – до 14%, *Equisetum* – 5-17%.

Палинозона 3 (1.55-0.96 м; 2.4-0.8 тыс. кал. л. н.). Доля пыльцы древесных растений в составе пыльцевого спектра в среднем составляет 91%. Доминирует *Pinus sibirica* 48-52%, *Picea* и *Abies* до 12-14% каждый. Для зоны характерно небольшое, по сравнению с остальными зонами, содержание пыльцы *Betula sect. Nanae* – 3-7%, и только в конце зоны ее участие возрастает до 12-17%. Количество пыльцы *Pinus sylvestris* (до 12%) и *Betula sect. Albae* (до 6%) отражает заносный характер. Отмечено сокращение пыльцы травянистых растений, пыльца рода *Artemisia*, семейств *Ranunculaceae* и *Rosaceae* встречается единично.

Палинозона 4 (0.96-0.0 м; 0.8 тыс. л.н. – настоящее время). Основной фон в палиноспектрах по-прежнему составляет пыльца деревьев (86%). *Pinus sibirica* сохраняет преимущество, но доля ниже, чем в предыдущих зонах. Содержание пыльцы *Picea* и *Abies* по 4-7%, за исключением интервала 0.80-0.64 м (620-500 кал. л. н.), где отмечено увеличение ели и пихты до 10 и 14% соответственно. В интервале 0.88-0.80 м (около 690-620 кал. л. н.) фиксируется относительно низкая концентрация пыльцы по сравнению с остальными пробами, участие темнохвойных пород в сумме составило 11.8%, содержание *Betula sect. Nanae* в составе данного спектра достигает 47.6%, а *Ericaceae* – 16%. В целом в этой палинозоне сопутствующее положение в группе трав и кустарничков занимают пыльцевые таксоны *Artemisia* и *Ericaceae* (3-7%). Присутствуют единичные пыльцевые зерна представителей семейств *Chenopodiaceae*, *Rosaceae*, *Ranunculaceae*, а также рода *Thalictrum*. Среди споровых растений, как и в палинозоне 2, абсолютный доминант – *Sphagnum* (91-98%).

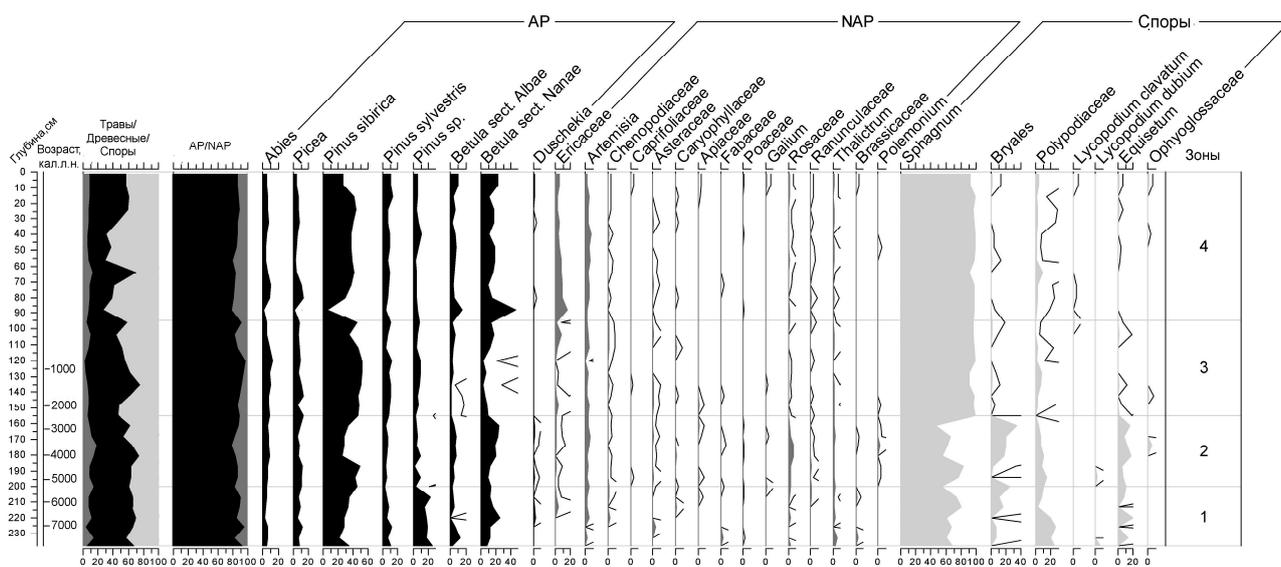


Рис. 5. Спорово-пыльцевая диаграмма отложений болота Мина. AP+NAP=100%.

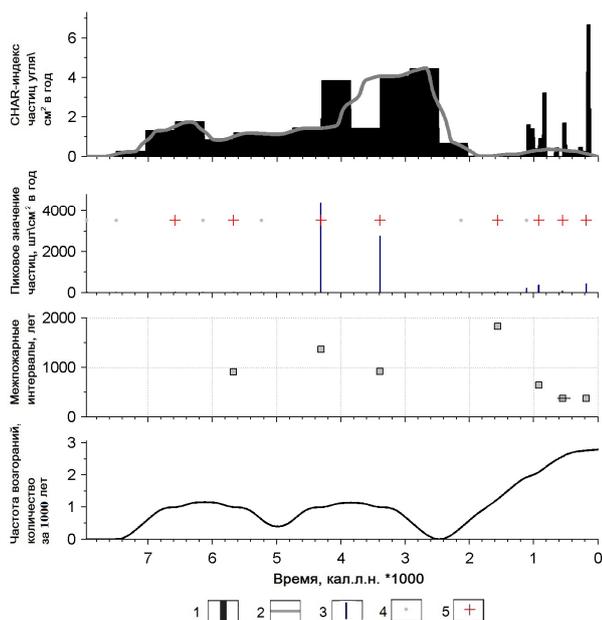
AP – древесные и кустарники, NAP – травянистые и кустарнички. Дополнительный контур показывает увеличение базового пыльцевого таксона в 10 раз.

Fig. 5. Spore-pollen diagram of the Mina mire deposits. AP+NAP=100%. AP – trees and shrubs, NAP – herbs and shrubs. The additional contour shows a 10-fold increase in the basic pollen taxon.

#### Анализ макрокопических частиц угля

Содержание частиц макроугля варьирует от единичных значений до нескольких сотен штук на  $1 \text{ см}^3$ . Максимальное количество приходится на интервалы: 0.08-0.16 м – 184 шт/см<sup>3</sup>, 1.61-1.87 м – до 291 шт/см<sup>3</sup> и в суглинке в слое 2.13-2.20 м – до 114 шт/см<sup>3</sup> (рис. 3). Пожарные эпизоды соответствуют следующим временным отметкам: 6600, 5750, 4300, 3400, 1550, 900, 550 и 200 кал. л. н. Именно в эти

временные окна наблюдались наибольшие превышения притока угля над его фоновым уровнем (рис. 6).



**Рис. 6.** Скорость аккумуляции макроскопических частиц угля и пиковые значения в пожарные эпизоды; межпожарный интервал и частота возгораний по данным изучения отложений болота Мина:

1 – контуры интерполированного притока древесного угля, 2 – смоделированный фоновый приток древесного угля, шт. (см<sup>2</sup> в год), 3 – пики древесного угля (разность интерполированного значения притока и фонового значения притока), 4 – пики, не превышающие пороговые, 5 – пожарный эпизод.

**Fig. 6.** Accumulation rate of macroscopic charcoal particles and peak values during fire episodes; interfire interval and fire frequency based on the study of Mina mire sediments:

1 – contours of interpolated charcoal inflow, 2 – simulated background charcoal inflow, pcs (cm<sup>2</sup> per year), 3 – charcoal peaks (difference between interpolated inflow value and background inflow value), 4 – peaks below threshold, 5 – fire episode.

Анализ макроскопических частиц угля позволил выделить три этапа усиления пожарной активности: I – около 6800-5400 кал. л. н., II – 4600-3200 кал. л. н. (включает 2 пожарных эпизода, отличающихся максимальным пиковым значением скорости аккумуляции угля), III – 1800 кал. л. н. – по настоящее время, отличается наименьшими межпожарными интервалами (около 200-400 лет). На даты 7500, 6200, 5250, 2200 и 1100 кал. л. н. пришлось пожарные события со скоростью аккумуляции угля, не превышающей пороговое значение. Средняя скорость аккумуляции древесного угля в основном составляет 2-4 частицы×см<sup>2</sup>/год. За последние 200 лет отмечено резкое увеличение данного показателя до 6 частиц×см<sup>2</sup>/год.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Комплекс полученных палеосигналов из отложений болота Мина, подкрепленный результатами радиоуглеродного датирования, позволил реконструировать следующий ход развития природных условий в Манско-Канском районе низких гор.

На склонах Кутурчинского и Койского Белогорья начиная с 7.9 тыс. кал. л. н. произрастали пихтово-елово-кедровые леса, периодически случались пожары. Заболачивание в пойме р. Мина началось по мере развития в долине перстративного или констративного режима аккумуляции (Lamakin, 1948; Kartashev, 1972; Shantzer, 1982). Последовавшее торфонакопление в совокупности с пожарной активностью может отражать реакцию ландшафтов на потепление и усиление аридизации в термический оптимум голоцена (7.5-6.0 тыс. л. н.) [Khotinsky, 1977; Wang et al., 2010]. Сигналы снижения общей увлажненности фиксируются и ниже по макросклону, в торфяниках, расположенных в пределах южной части Рыбинской впадины (рис. 1) [Mikhailova et al., 2021;

Grenaderova et al., 2024b]. В восточной части Восточного Саяна в пределах Окинского хребта начало торфонакопления также приходится на данный интервал [Bezrukova et al., 2004]. Вероятно, это вызвано снижением речного стока из-за уменьшения притока талых ледниковых вод.

Накоплению мощных аллювиальных и озерных отложений (предшествующих торфообразованию) на отдельных участках речной долины способствует переход от стадии врезания к стадии равновесия. Одна из причин развития участков реки с замедленным течением – формирование структуры, аналогичной периферийному компенсационному валу, в результате гляциоизостатических движений. Как, например, в Восточных Альпах, где, по данным исследования [Meu et al., 2016], даже небольшие оледенения способны оказывать существенное влияние на величины прогибания и компенсационного поднятия. Е.Н. Былинский [Bylinsky, 1996] считал, что воздействие гляциоизостазии не ограничено покровными оледенениями, а имеет глобальное (планетарное) распространение. Известно, что в Восточном Саяне позднеплейстоценовое оледенение охватывало большую территорию, и в МИС 2 (Морская изотопная стадия; 24-11 тыс. л. н.) имели место крупные ледники [Arzhannikov et al., 2015].

Период 5.3-4.1 тыс. кал. л. н. в районе исследования отличался стабильно высоким увлажнением. Склоны Кутурчинского и Койского Белогорья покрывали пихтово-елово-кедровые леса с разнотравно-папоротниковым напочвенным покровом. На присклоновом понижении в пойме р. Мина произрастал заболоченный ельник. Временной интервал 4.5-4.1 тыс. кал. л. н. характеризуется прохождением пожаров и усилением поверхностной эрозии, повлекшей высокий привнос минеральных частиц на болото. Распространению пожаров в это время могла способствовать периодическая сухость летних сезонов, когда интенсивно горели значительные запасы лесных горючих материалов, накопленные при достаточном увлажнении.

Известно, что пожары существенно трансформируют водный баланс рек с облесенным водосбором. Снижение сомкнутости крон способствует сокращению периода снеготаяния, что влечет увеличение поверхностного стока в кратковременный период и приводит к усилению эрозии и росту твердого стока рек, что может отразиться в виде прослоек, обогащенных минеральным материалом, в торфяниках [Pomeroy et al., 1998; Chang, 2003]. Развитие постпирогенной эрозии особенно хорошо прослеживается на склонах крутизной более 12° [Gabbasova et al., 2019], которые занимают свыше 50% площади водосбора реки Мина.

На период 4.1-3.3 тыс. кал. л. н. выпадает максимум по содержанию макрочастиц угля. Слой отличается наибольшим содержанием крупных угольков размером около 1 мм, свидетельствующих о близкой к точке исследования локализации пожара. Состав спорово-пыльцевых спектров фиксирует снижение сомкнутости темнохвойных пород и расширение травянистых ассоциаций. Совокупность выявленных палеосигналов может указывать на снижение общей увлажненности и высокую пожарную активность, которая способствовала увеличению освещенности территории, усилению роста и развитию растений нижних ярусов – кустарников и трав. Это связано с повышением содержания минеральных веществ в почве, улучшением светового режима [Valendik, Ivanova, 1989; Ivanova, Golubtsova, 2014]. Усиление пожарной активности в данный период хорошо согласуется со среднесуббореальным термическим максимумом (4200-3200 лет назад), который выделяется Н.А. Хотинским [Khotinsky, 1982] для Северной Евразии, или, в глобальном масштабе, с «событием 4.2» (4.2-3.8 тыс. кал. л. н.) [Mayewski et al., 2004; Wang et al., 2010]. На восточном макросклоне Восточного Саяна изменения в составе растительных сообществ в период с 4450 по 2750 л. н. связывают с нарастающей континентальностью климата, увеличением аридности [Bezrukova et al., 2004].

Известное для умеренных широт Северного полушария похолодание около 2700-2600 л. н. [Shnitnikov, 1957], проявление которого отмечено в высокогорной зоне Восточного Саяна [Bezrukova et al., 2004], на Алтае [Galakhov et al., 2012], в Прибайкалье [Vorobyeva, 2010], нашло отражение и на болоте Мина. Здесь на смену ельнику сфагновому приходит ерник кустарничково-болотнотравно-сфагновый с *Pinus sibirica* в древесном ярусе.

Начиная с 2.4 тыс. кал. л. н. количество пыльцы темнохвойных пород в составе пыльцевого спектра постепенно увеличивается (до 70%), содержание ели достигает 13.6%. Это может свидетельствовать о широком распространении *Picea* в структуре древостоя и стабильно высокой влажности почв [Koltsova, 1980; Bezrukova et al., 2005]. В это же время в напочвенном покрове болота господствует сфагновый мох, доминирует *Sph. angustifolium*. Болото переходит с евтрофно-

мезотрофной стадии развития на мезотрофную, что совпадает со значительным уменьшением величины солнечной инсоляции [Berger, Loutre, 1991], для 55° с.ш. примерно до 480-490 Wm<sup>2</sup>.

Около 2.0-1.6 тыс. кал. л. н. отмечено снижение обилия ели до 5.2%, восстановление до прежнего уровня (13.7%) произошло около 1.6-1.1 тыс. кал. л. н. В составе пыльцы травянистых растений зафиксировано высокое разнообразие (9 таксонов), несмотря на низкое участие этой группы в пыльцевом спектре (6%). В составе локального болотного сообщества в это время был развит ерник кустарничково-болотнотравно-сфагновый.

Временной интервал 1.1-0.9 тыс. кал. л. н. характеризуется максимумом пыльцы древесных в соотношении древесные/травянистые/споры, среди которых доминирует пыльца темнохвойных пород (68-73% от суммы пыльцы – максимум за весь период реконструкции), участие *Pinus sibirica* – 50-52%, *Picea* – до 11%, *Abies* – до 12%. Пожарные эпизоды установлены для 1100 и 900 кал. л. н. Данный период согласуется со Средневековым климатическим оптимумом, который охватывал значительные районы северного полушария примерно с 830 по 1100 г. н. э. [PAGES 2k Consortium, 2013; Moberg et al., 2005] и создал самые благоприятные условия для развития пихтово-елово-кедровых лесов на склонах Койского и Кутурчинского Белогорья.

Самыми кардинальными перестройками в составе растительного покрова характеризуется период 750-650 кал. л. н.: концентрация пыльцы крайне низкая, участие хвойных в формировании пыльцевого спектра минимальное, основу составляют зерна *Betula sect. Nanae* (свыше 65 %), пыльца *Ericaceae* и споры *Sphagnum*. По данным реконструкции, выполненной [Borisova, Panin, 2019] по отложениям из озера Тере-Холь (юго-восток Тувы), период 700-400 л. н. приходится на криоксеротическую фазу.

В интервале 620-500 кал. л. н. фиксируются стабильно влажные условия, развиты пихтово-елово-кедровые леса (доля пыльцы пихты и ели в составе древесных достигает соответственно 11 и 14%). Позднее, около 500-450 кал. л. н., значительно возрастает участие сосны сибирской в составе лесов (доля в пыльцевом спектре – 41%). Одновременно снижается участие других темнохвойных таксонов (до 4-7%), споровых растений – до 20% (вместо стабильных 50-55%), из которых 9% приходится на *Polypodiaceae*, а 91% – на споры *Sphagnum*. В группе травянистые+кустарнички отмечен максимум *Ericaceae* и *Artemisia*, что может отражать условия усиления континентальности. Известно, что вид *P. sibirica*, по сравнению с другими темнохвойными породами, более засухоустойчив, лучше защищен от чрезмерной солнечной инсоляции и повышения температуры [Pakharkova et al., 2020], что позволило виду удерживать господствующее положение в структуре древостоя.

Далее, около 450-400 кал. л. н., при сохранении доминирующего положения *P. sibirica* отмечена относительно низкая пыльцевая продуктивность (в 1 капле мацерата фиксируется в 2.5 раза меньше пыльцы, 130 зерен вместо 300). Известно, что интервал от 1600 до 1826 г. н. э. являлся наиболее холодным периодом Малого ледникового периода, температуры около 400 лет назад были примерно на 0.7°C ниже среднего показателя 1961-1990 гг. [Moberg et al., 2005].

Позже на исследуемой территории отмечались стабильно влажные и прохладные условия, на склонах развиты пихтово-елово-кедровые леса, на болоте – ерник зеленомошно-сфагновый, в моховом покрове наряду с доминантом *Sphagnum angustifolium* отмечены *Sph. rubellum*, *Sph. fuscum*, а также *Sph. cuspidatum*, среди зеленых мхов: *Drepanocladus sp.*, *Politrichum strictum* и *Pleurozium shreberi*.

Скорость аккумуляции угля за последние 150 лет достигла максимума – до 7 частиц на 1 см<sup>2</sup> в год (рис. 4), что отражает нарастающую интенсивность пожаров, характерную для всего северного полушария [Goldammer et al., 2013; Valendik et al., 2014; Ponomarev, Naruk, 2016], в составе лесов увеличивается участие *Pinus sylvestris*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате настоящего исследования получены новые палеоэкологические данные для западной части Восточного Саяна. Непрерывная стратиграфическая последовательность отложений болота Мина позволила, опираясь на индикаторы палеогеографической обстановки, проследить изменения ландшафтно-климатических особенностей в районе Манско-Канских низких гор на протяжении большей части голоцена.

В начале голоцена на некоторых участках русла реки Мина происходил переход от стадии врезания к стадии равновесия, что привело к накоплению в долине мощных аллювиальных и старичных отложений. В термический оптимум голоцена (7.5-6.0 тыс. л. н.) этот процесс способствовал активизации торфообразования. Длительное время на болоте был развит ельник осоково-сфагновый. Выпадение древесного яруса и переход болота на мезотрофную стадию с господствующим положением сфагнового мха пришелся на 2700-2400 кал. л. н.

В течение всего рассматриваемого периода, начиная с 7.9 тыс. кал. л. н., на склонах Кутурчинского и Койского Белогорья произрастали пихтово-елово-кедровые леса. Ориентированность склонов перпендикулярно направлению господствующих ветров и низкогорное положение обеспечивали достаточное увлажнение и смягчение климатических флуктуаций.

Однако глобальные климатические изменения нашли некоторое отражение в относительно стабильной видовой структуре лесов изучаемого района. Так, нарастание континентальности во время среднесуббореального термического максимума способствовало усилению пожарной активности и развитию постпирогенной эрозии, повлекшей привнос на болото различных микрочастиц (пирит, новообразования барита, кристаллы циркона, кварца, ортоклаза, альбита, остатки древесины со вскрытыми и истонченными в результате пиролиза клеточными стенками, углистые частицы, покрытые алюмосиликатом). Кроме того, в данный временной интервал отмечено сокращение ареала *Pinus sibirica* и увеличение площади, занятой травянистыми сообществами.

Наиболее благоприятные условия для развития пихтово-елово-кедровых лесов в низкогорье на склонах Койского и Кутурчинского Белогорья складывались 1060-870 кал. л. н. – в период Средневекового климатического оптимума. В это же время на болотах, расположенных ниже по склону (болото Большое, Сосновка), отмечено снижение увлажнения [Grenaderova et al., 2024a, b].

Вероятно, похолодания в конце голоцена являются причиной низкой пыльцевой продуктивности хвойных пород. Это отразилось в минимальной пыльцевой наполненности проб из отложений, сформированных 750-650 кал. л. н. и 450-400 кал. л. н.

В последние 150-200 лет происходило сокращение доли *Pinus sibirica* и увеличение содержания *Pinus sylvestris* в составе древостоя, что в совокупности со стабильно высоким содержанием макроугля отражает нарастающую континентальность климата.

## ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00341, <https://rscf.ru/project/23-27-00341/>.

Авторы выражают благодарность сотрудникам R&D-центра ГМК «Норильский никель» Сибирского федерального университета С.А. Сильянову и Б.М. Лобастову за выполнение минералогического анализа и сканирующей электронной микроскопии.

## ЛИТЕРАТУРА

Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V., Braucher R., Jolivet M. 2015. Late pleistocene glaciations in southern East Sayan and detection of MIS 2 terminal moraines based on beryllium (<sup>10</sup>Be) dating of glacier complexes. *Russian geology and geophysics*, 56(11): 1509–1521. DOI: 10.1016/j.rgg.2015.10.001

Berger A., Loutre, M.F. 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4): 297–317. DOI: 10.1016/0277-3791(91)90033-q

Beug H.-J. 2004. *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete*. Publisher Verlag Friedrich Pfeil, Munich, 542 pp. DOI: 10.1002/jqs.915

Bezrukova E.V., Abzaeva A.A., Letunova P.P., Kulagina N.V., Vershinin K.E., Belov A.V., Orlova L.A., Danko L.V., Krapivina S.M. 2005. Post-glacial history of Siberian spruce (*Picea obovata*) in the Lake Baikal area and the significance of this species as a paleo-environmental indicator. *Quaternary International*, 136(1): 47–57. DOI: 10.1016/j.quaint.2004.11.007

Bezrukova E.V., Kulagina N.V., Reshetova S.A., Shchetnikov A.A., Krainov M.A., Filinov I.A. 2022. Environment of the Oka plateau (East Sayan mountains) in the late glacial and holocene: A case study of a complex record from the lake Khikushka sediments. *Geomorphology*, 53(3): 61–73. DOI: 10.31857/S043542812203004X

Bezrukova E.V., Vershinin K.E., Letunova P.P., Orlova L.A., Krapivina S.M., Chepinoga V.V., Verkhozina A.V., Dudareva N.V., Abzaeva A.A. 2004. Vegetation of the highlands of the Eastern Sayan in the Late Holocene according to the study of peat deposits. *Botanical Journal*, 89(2): 221–232 (in Russian). [Безрукова Е.В., Вершинин К.Е., Летунова П.П., Орлова Л.А., Крапивина С.М., Чепинога В.В., Верхозина А.В., Дударева Н.В., Абзаева А.А. 2004. Растительность высокогорий

- Восточного Саяна в позднем голоцене по данным изучения торфяных отложений // Ботанический журнал. Т. 89. № 2. С. 221–232]
- Blaauw M. 2010. Methods and code for “classical” age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5(5): 512–518. DOI: 10.1016/j.quageo.2010.01.002
- Blyakharchuk T.A. 2011. Changes in vegetation and climate of the Western Sayan and their relationship with the development of archaeological cultures of the region in the second half of the Holocene according to the spore-pollen analysis of marsh sediments. *Bulletin of Tomsk State University*, 351: 145–151 (in Russian). [Бляхарчук Т.А. 2011. Изменение растительности и климата Западного Саяна и их взаимосвязь с развитием археологических культур региона во второй половине голоцена по данным спорово-пыльцевого анализа болотных отложений. Вестник Томского государственного университета. № 351. С. 145–151.]
- Blyakharchuk T.A., Kurina I.V. 2021. Late Holocene environmental and climatic changes in the Western Sayan Mountains based on high-resolution multiproxy data. *Boreas*, 50: 919–934. DOI: 10.1111/bor.12493
- Borisova O.K., Panin A.V. 2019. Multicentennial climatic changes in the Tere-Khol basin, Southern Siberia, during the late Holocene. *Geography environment sustainability*, July 2019 DOI: 10.24057/2071-9388-2018-64
- Bylinsky E.N. 1996. *Glacio-isostatic influence on the Earth's relief development in the pleistocene*. Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 210 pp. (in Russian). [Былинский Е.Н. 1996. Влияние гляциоизостазии на развитие рельефа Земли в плейстоцене. Москва: Издательство РАН, 210 с.]
- Chang M. 2003. *Forest hydrology: an introduction to water and forests*. CRC Press, Boca Raton, 373 pp. DOI: 10.1201/b13614
- Chernova N.A. 2005. On the formation of the marshes of the Ergaki ridge. *Trudy zapovednika «Tigirekskiy»*, 1, 159–161 (in Russian) DOI: 10.53005/20767390\_2005\_1\_159 [Чернова Н.А. 2005. О формировании болот хребта Ергаки // Труды заповедника «Тигирекский». № 1. С. 159–161. DOI: 10.53005/20767390\_2005\_1\_159]
- Clark J.S. 1988. Particle Motion and the Theory of Charcoal Analysis: Source Area, Transport, Deposition, and Sampling. *Quaternary Research*, 30(01): 67–80. DOI: 10.1016/0033-5894(88)90088-9
- Clark J.S., Lynch J.A., Stocks B.J., Goldammer J.G. 1998. Relationships between charcoal particles in air and sediments in west-central Siberia. *The Holocene*, 8(1): 19–29. <https://doi.org/10.1191/095968398672501165>
- Decree of the President of the Russian Federation No. 529 dated June 18, 2024 "On approval of priority areas of scientific and technological development and the list of the most important high-tech technologies". 2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306389112> (Last accessed: 22.11.2024) (in Russian). [Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 года № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий». 2024. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306389112> (дата обращения: 22.11.2024)]
- Dombrovskaya A.V., Koreneva M.M., Turemnov S.N. 1959. *Atlas of plant residues found in peat*. Gosjenergoizdat, Moscow, Leningrad, 137 pp. [Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. 1959. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. Москва, Ленинград: Госэнергоиздат, 137 с.]
- Draft forest plan of the Krasnoyarsk Territory 2019-2028. 2018. Ministry of Natural Resources and Forestry of the Krasnoyarsk Territory, Krasnoyarsk. URL: [http://mlx.krskstate.ru/dat/File/57/proekt\\_les\\_plan/Lesnoy%20plan%2026.11.2018.zip](http://mlx.krskstate.ru/dat/File/57/proekt_les_plan/Lesnoy%20plan%2026.11.2018.zip) (Last accessed: 22.11.2024) (in Russian). [Проект лесного плана Красноярского края 2019-2028 гг. 2018. Красноярск: Министерство природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края. URL: [http://mlx.krskstate.ru/dat/File/57/proekt\\_les\\_plan/Lesnoy%20plan%2026.11.2018.zip](http://mlx.krskstate.ru/dat/File/57/proekt_les_plan/Lesnoy%20plan%2026.11.2018.zip) (дата обращения: 22.11.2024)]
- Gabbasova I.M., Garipov T.T., Suleimanov R.R., Komissarov M.A., Khabirov I.K., Sidorova L.V., Nazyrova F.I., Prostyakova Z.G., Kotlugalyamova E.Yu. 2019. The influence of ground fires on the properties and erosion of forest soils in the southern urals (Bashkir state nature reserve). *Eurasian Soil Science*, 52(4): 370–379.
- Galakhov V.P., Chernykh D.V., Zolotov D.V., Orlova L.A. 2012. Location and time of moraine forming of Fernau and Historic stages in the basin of Khaidun River, Altai. *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 144(6): 15–21.
- Goldammer J.G., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I. 2013. Current Fire Regimes, Impacts and the 226 Likely Changes – II: Forest Fires in Russia – Past and Current Trends. In: *Vegetation Fires and Global Change: 227 Challenges for Concerted International Action. A White Paper Directed to the United Nations and International 228 Organizations* (Goldammer J.G., Ed.), pp. 51–79, Global Fire Monitoring Center (GFMC)/Kessel Publishing House, Eifelweg, Germany.
- GOST 11306-2013. 2019. *Peat and products of its processing*. Methods for determination of ash content. Standartinform, Moscow, 6 pp. (in Russian). [ГОСТ 11306-2013. 2019. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. Стандартинформ, Москва, 6 с.]
- Grenaderova A.V., Mikhailova A.B., Kuryina I.V., Podobueva O.V. 2024a. The vegetation cover response in the Eastern Sayan foothills to Holocene climate extremes (according to paleoecological researches of Bolshoye peat bog). *Geomorphology and paleogeography*, 55(4): 163–183. (in Russian). [Гренадерова А.В., Михайлова А.Б., Курьина И.В., Подобуева О.В. 2024а Отклик растительного покрова в предгорье Восточного Саяна на голоценовые экстремумы климата (по данным изучения болота Большое). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 4. С. 163–183. DOI: 10.31857/S2949178924040107
- Grenaderova A.V., Mikhailova A.B., Sharafutdinov R.A., Stoyko T.G. 2024b. Holocene environmental conditions in the Eastern Sayan foothills according to a comprehensive paleoecological study of the Sosnovka mire. *Limnology and Fresh water Biology*, 4: 394–396. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-394
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analysis of fossil pollen and spores and its application to paleogeography. *Geografiz*, Moscow, 224 pp. (in Russian). [Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Географиз, Москва. 224 с.]
- Helama S., Jones P.D., Briffa K.R. (2017) Dark Ages Cold Period: A literature review and directions for future research. *The Holocene*, 27(10): 1600–1606. DOI: 10.1177/0959683617693898
- Higuera P.E. 2009. *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis*, USA: Montana State University, MT, Bozeman, 27 pp.

- Ivanova N.A., Golubtsova O.S. 2014. *Environmental factors and functional processes in herbaceous plants during pyrogenic forest succession*. Publishing House of Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, 152 pp. (in Russian) [Иванова Н.А., Голубцова О.С. 2014. Факторы среды и функциональные процессы у травянистых растений при пирогенной сукцессии леса. Издательство Нижневартовского государственного университета, Нижневартовск, 152 с.]
- Juggins S. C. 2003. *User guide Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualization*. University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, 69 pp.
- Кас N.Я., Кас S.V., Скобеева E.I. 1977. *Atlas of plant residues in peats*. Nedra, Moscow, 371 pp. (in Russian). [Кас Н.Я., Кас С.В., Скобеева Е.И. 1977. Атлас растительных остатков в торфах. Недра, Москва, 371 с.]
- Kartashev I. P. 1972. *Basic patterns of geological activity of rivers in mountainous countries*. Nauka, Moscow, 212 pp. (in Russian). [Карташев И. П. 1972. Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран. Наука, Москва, 212 с.]
- Khotinsky N.A. 1977. *Holocene of Northern Eurasia: Experience of transcontinental correlation of stages of development of vegetation and climate*. Nauka, Moscow, 197 pp. (in Russian). [Хотинский Н.А. 1977. Голоцен Северной Евразии: Опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. Наука, Москва, 197 с.]
- Khotinsky N.A. 1982. Holocene chronosections: controversial problems of Holocene Paleogeography. In: *Razvitie prirody territorii SSSR v pozdnem pleistocene i golocene*, pp. 142–147, Nauka, Moscow (in Russian). [Хотинский Н.А. 1982. Голоценовые хроносрезы: дискуссионные проблемы палеогеографии голоцена // Развитие природы территории СССР в позднем плейстоцене и голоцене. Москва: Наука. С. 142–147.]
- Koltsova V.G. The history of the forest vegetation of the Stolby Nature Reserve in the Holocene. Abstract dis. cand. biol. sciences. Krasnoyarsk: V.N. Sukachev Institute of Forest and Timber, 150 pp. (in Russian) [Кольцова В.Г. 1980. История лесной растительности заповедника "Столбы" в голоцене. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева, 150 с.]
- Korotkov I.A. 1994. Forest-growing zoning of Russia and the republics of the former USSR. In: *Carbon in ecosystems of forests and swamps of Russia* (V.A. Alekseev, R.A. Berdsi eds.), pp. 29–47, VC SB RAS, Krasnoyarsk (in Russian). [Коротков И.А. 1994. Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. В. А. Алексеева и Р. А. Бердси. Красноярск: ВЦ СО РАН. С. 29–47.]
- Krasnoborov I.M. 1963. Flora and vegetation of the Kuturchinsky belogorie (Eastern Sayan). Abstract dis. cand. biol. sciences. Moscow, 21 pp. (in Russian) [Красноборов И.М. 1963. Флора и растительность Кутурчинского белогорья (Восточный Саян). Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 21 с.]
- Kulikova G.G. 1974. *A short guide to botanical analysis of peat*. MSU, Moscow. 94 pp. (in Russian). [Куликова Г.Г. 1974. Краткое пособие к ботаническому анализу торфа. Изд-во Московского университета, Москва, 94 с.]
- Kurpjanova L.A., Aleshina L.A. 1972. *Pollen and spores of plants of the flora of the USSR*. Nauka, Leningrad, 1: 171 pp. (in Russian). [Курпянова Л.А., Алешина Л.А. (1972). Пыльца и споры растений флоры СССР. Л.: Наука. Т. 1. 171 с.]
- Lamakin V.V. 1948. Dynamic phases of river valleys and alluvial deposits. *Zemlevedenie*, 2 (42): 154–187. (in Russian). [Ламакин В.В. 1948. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений // Землеведение. Т. 2 (42). С. 154–187.]
- Largin I.F. (ed.) 1977. *Peat deposits and their exploration (guidelines for laboratory and practical exercises)*. Nedra, Moscow, 264 pp. (in Russian). [Ларгин И.Ф. (ред.). 1977. Торфяные месторождения и их разведка (руководства по лабораторно-практическим занятиям). Недра, Москва, 264 с.]
- MacArthur R.H. 1957. On the relative abundance of bird species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 43(3): 293–295. DOI: 10.1073/pnas.43.3.293
- Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C., Karlen W., Maasch K.A., Meeker L.D., Meyerson E.A., Gasse F., van Kreveld Sh., Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R.R., Steig E.J. 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62: 243–255. DOI: 10.1016/j.yqres.2004.07.001
- Mey J., Scherler D., Wickert A.D., Egholm D.L., Tesauro M., Schildgen T.F., Strecker M.F. 2016. Glacial isostatic uplift of the European Alps. *Nature Communications*, 7: 13382. DOI: 10.1038/ncomms13382
- Mikhailov N.I. 1961. *Mountains of Southern Siberia*. Moscow, 238 pp. (in Russian) [Михайлов Н.И. 1961. Горы Южной Сибири. Москва, 238 с.]
- Mikhailova A.B., Grenaderova A.V., Kurina I.V., Shumilovskikh L.S., Stojko T.G. 2021. Holocene vegetation and hydroclimate changes in the Kansk forest steppe, Yenisei River Basin, East Siberia. *Boreas*, 50: 948–966. DOI: 10.1111/bor.12542
- Moberg A., Sonechkin D.M., Holmgren K., Datsenko N.M., Karlen W. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433: 613–617. DOI: 10.1038/nature03265
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. 1991. *Pollen analysis*. Blackwell scientific publications, Oxford, 216 p.
- Nikolaev V.A., Chernov A.F. 1988. *Relief of the Altai-Sayan mountain region*. Nauka, Novosibirsk, 204 p. (in Russian). [Николаев В.А., Чернов А.Ф. 1988. Рельеф Алтае-Саянской горной области. Наука, Новосибирск, 204 с.]
- PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geoscience*, 6: 339–346. DOI: 10.1038/ngeo1797
- Pakharkova N., Borisova I., Sharafutdinov R., Gavrikov V. 2020. Photosynthetic Pigments in Siberian Pine and Fir under Climate Warming and Shift of the Timberline. *Forests*, 11(1), 63. DOI: 10.3390/f11010063
- Parmuzin Y.P. 1964. Middle Siberia. Mysl', Moscow, 308 p. [Пармузин Ю.П. 1964. Средняя Сибирь. Мысль, Москва, 308 с.]
- Peltier W.R. 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Repository Geology Science*, 32: 111–149. DOI: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359
- Pomeroy J. W., Gray D. M., Shook K. R., Toth J. B., Essery R. L. H., Pietroniro A., Hedstrom N. 1998. An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surfacemodeling. *Hydrological Processes*, 12: 2339–2367.
- Ponomarev E.I., Haruk V.I. 2016. Wildfire Occurrence in Forests of the Altai-Sayan Region under Current Climate Changes. *Siberian Ecological Journal*, 1: 38–46.

- R Core Team. 2013. *R: A language and environment for statistical computing*. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rodionova A.B., Grenaderova A.V. 2016. Peat soils of the Kansk forest-steppe (genesis and classification). *Vestnik KrasGAU*, 4: 65–72. (in Russian) [Родионова А.Б., Гренадерова А.В. 2016. Торфяные почвы Канской лесостепи (генезис и классификация) // Вестник КрасГАУ. № 4. С. 65–72.]
- Rodionova A.B., Grenaderova A.V. 2018. Peatland development and paleoclimate records from the Holocene peat archive in the foothills of the Eastern Sayan Mountains. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 138. DOI: 10.1088/1755-1315/138/1/012014
- Shantzer E.V. (ed.) 1982. *Stratigraphy of the USSR. Quaternary system*. Nedra, Moscow, 443 pp. (in Russian). [Шанцер Е. В. (ред.). 1982. Стратиграфия СССР. Четвертичная система. Полугом 1. Недра, Москва, 443 с.]
- Shnitnikov A.V. 1957. *Variability of the total moisture content of the continents of the Northern Hemisphere*. Zapiski Geograficheskogo obshhestva SSSR. Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, Vol. 16. Moscow, Leningrad, 337 pp. (in Russian) [Шнитников А.В. 1957. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария. Записки Географического общества СССР. Т. 16. Москва, Ленинград: Издательство Академии наук СССР. 337 с.]
- Filipchuk A., Malysheva N., Zolina T., Yugov A. 2020. The Boreal Forest of Russia: Opportunities for the Effects of Climate Change Mitigation. *Forestry information*, 1: 92–113 (in Russian). [Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Золина Т.А., Югов А.Н. 2020. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата // Лесохоз. информ. № 1. С. 92–113. URL: <http://lhi.vniilm.ru/> ]. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10.
- Valendik E.N., Ivanova G.A. 1989. Extreme fire-hazardous seasons in the forests of Siberia. *Lesnoe hozyajstvo*, 5: 57–59 (in Russian). [Валендик Э.Н., Иванова Г.А. 1989. Экстремальные пожароопасные сезоны в лесах Сибири // Лесное хозяйство. № 5. С. 57–59.]
- Valendik E.N., Verkhovets S.V., Ponomarev E.I., Ryzhkova V.A., Kisilyakhov Y.K. 2014. Large Wildfires in Taiga Subzones of Central Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 7(1): 43–56. DOI: 10.17516/1997-1389-0092
- Volkova I.I. 2005. On the problem of studying swamps in the Altai Mountains. *Trudy zapovednika «Tigirekский»*, 1, 67–70 (in Russian). [Волкова И.И. 2005. К проблеме изучения болот в горах Алтая // Труды заповедника «Тигирекский». Вып. 1. С. 67–70.]
- Vorobyeva G.A. 2010. *Soil as a chronicle of natural events in the Baikal region: problems of evolution and classification of soils*. Irkutsk State University Publishing House, Irkutsk. 205 pp. (in Russian). [Воробьева Г.А. 2010. Почва как летопись природных событий Прибайкалья: проблемы эволюции и классификации почв. Иркутск: Издательство Иркутского государственного университета. 205 с.]
- Wang Y., Liu X., Herzschuh U. 2010. Asynchronous evolution of the Indian and East Asian summer monsoon indicated by Holocene moisture patterns in monsoonal central Asia. *Earth-Science Reviews*, 103: 135–153. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.09.004

Поступила в редакцию: 17.10.2024  
 Переработанный вариант: 25.11.2025  
 Принято в печать: 15.03.2025

# CHANGES IN THE WATER-THERMAL REGIME OF PERMAFROST SWAMPS IN WESTERN SIBERIA IN RESPONSE TO CLIMATE WARMING

*Morozov A.P.\*, Moskvina Yu.P.*

*Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия*

\*antonmorozov43@yandex.ru

**Citation:** Morozov A.P., Moskvina Yu.P. 2025. Changes in the water-thermal regime of permafrost swamps in western siberia in response to climate warming. *Environmental dynamics and global climate change*. 16(1): 49–53.

**DOI:** 10.18822/edgcc635183

Рассмотрены изменения водно-теплового режима бугристых и полигональных болот зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. Подробные исследования водно-теплового режима болот на данной территории проводились с 1971 по 1991 год. В настоящей работе используется математическая модель бугристых и полигональных болот, которая была разработана по результатам этих исследований.

В качестве входных параметров модели используются ежедневные метеорологические данные с 23 станций. Продолжительность наблюдений метеостанций составляет от 90 до 140 лет. Указанный период разделен на две части: до и после 1978 года.

Результаты расчётов указывают на повсеместное увеличение средних за тёплый период значений температуры воздуха: от 0.3 °C на юге до 1.6 °C на севере. В наиболее тёплые годы (2.5% обеспеченности) указанное повышение на юге зоны составляет 1.5 °C, а на Крайнем Севере – 3.5 °C. Наибольшие изменения в параметрах водно-теплового режима прослеживаются в увеличении глубины оттаивания торфяной залежи. Так, в среднем максимальное оттаивание увеличилось на 4–5 см, а в наиболее тёплые годы – на 7–10 см. Для севера полигональных болот разница в глубине оттаивания в отдельные годы достигает 16 см.

Предполагается, что изменения водно-теплового режима бугристых и полигональных болот будут способствовать последовательной эволюции структуры микроландшафтов. Смещение границ различных типов болот затруднено орографическими препятствиями и требует полномасштабной перестройки гидрографической сети и структуры микроландшафтов.

**Ключевые слова:** бугристые болота, полигональные болота, водно-тепловой режим болот, глубина оттаивания, изменение климата.

Changes in the water-thermal regime of swamps in the permafrost zone of Western Siberia are considered. Two types of swamps are prevalent in the study area: frost mound bogs (southern half of the area) and polygonal bogs (northern half of the area). The boundary between these swamps types is blurred and approximately matches the Polar Circle line. Detailed studies of the water-thermal regime of swamps in this area were carried out from 1971 to 1991 within the framework of the West Siberian expedition of the State Hydrological Institute. The present work uses a mathematical model of frost mound and polygonal bogs, which was developed based on the results of these studies.

Daily meteorological data, specifically daily data on air temperature, precipitation totals and total and lower cloudiness from 23 stations are used as input parameters of the model. The duration of observations of meteorological stations ranges from 90 to 140 years. The mentioned period is divided into 2 parts, before and after 1978. All calculations were limited to the warm period, the boundaries of which are the transitions of average daily air temperature through 0 °C.

The results of calculations indicate a widespread increase in the average warm period air temperature values, from 0.3 °C in the south to 1.6 °C in the north of the territory. In the warmest years (2.5% probability of exceeding) this increase in the south of the zone is 1.5 °C and in the extreme north is 3.5 °C. The greatest changes in the parameters of the water-thermal regime can be traced in the increase of the peat deposit thawing depth. In average, the maximum thawing increased by 4–5 cm, and in the warmest years by 7–10 cm. For the north of polygonal bogs, the difference in thawing depth in some years increases dramatically and reaches 16 cm. At the same time, it should be noted that the calculated thawing depth often exceeds the peat deposit thickness, especially in the northern part of polygonal bogs. In such cases, the peat deposit thawing values should be considered as potential.

It is supposed that changes in the water-thermal regime of frost mound and polygonal bogs will contribute to the sequential evolution of the micro-landscape structure. The displacement of the boundaries of different types of swamps is complicated by orographic obstacles, primarily by the Siberian Uvals and requires a full-scale reorganization of the hydrographic network and structure of micro-landscapes.

**Key words:** palsa bogs, polygonal bogs, water-thermal regime of swamps, thawing depth, climate change.

## ВВЕДЕНИЕ

Всеобщее потепление климата, несомненно, приводит к изменению составляющих водного и теплового балансов различных природных ландшафтов. В свою очередь, указанные изменения могут вызывать смещение природных зон и частичный переход из одного вида ландшафта в другой. В данной статье рассмотрены изменения водно-теплового режима болот зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири, которая располагается севернее линии Сибирских Увалов. Для зоны многолетней мерзлоты характерно распространение двух типов верховых болот: бугристые (южная часть зоны) и полигональные (северная часть). Граница между этими типами болот в Западной Сибири приблизительно совпадает с линией полярного круга.

Водно-тепловой режим болот в Западной Сибири подробно был исследован в период с 1971 по 1991 год. Основные результаты исследований изложены в публикации [Novikov, 2009]. Данные исследования послужили основой для разработки математической модели для расчета основных водно-тепловых характеристик деятельного слоя болот зоны многолетней мерзлоты для различных микроландшафтов бугристых и полигональных болот, расположенных в указанном регионе.

Основной целью текущей работы являлась оценка изменчивости водно-теплового режима бугристых и полигональных болот Северо-Западной Сибири. Для этого были подготовлены и обработаны метеорологические данные, которые затем использовались в модели для расчётов показателей водно-теплового режима, которые, в свою очередь, были обобщены и проанализированы.

## МЕТОДИКА

Для оценки водно-теплового режима болот зоны многолетней мерзлоты использовались ежедневные данные метеорологических станций по температуре воздуха, суммам осадков, общей и нижней облачности. Сведения о метеорологических станциях, привлекаемых для расчета параметров водно-теплового режима болот, приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Метеостанции, данные которых использовались для расчёта водно-тепlobалансовых характеристик.

**Table 1.** Weather stations whose data were used to calculate water-heat balance characteristics.

Станции	Широта, ° с. ш.	Тип болот	Подзона	Год начала наблюдений
Берёзово	63.92	бугристые	юг	1881
Тарко-Сале	64.92	бугристые	юг	1937
Казым	63.72	бугристые	юг	1932
Толька	63.98	бугристые	юг	1947
Мужи	65.38	бугристые	север	1932
Полуй	66.03	бугристые	север	1953
Салехард	66.53	бугристые, полигональные	север, юг	1882
Тазовское	67.47	полигональные	юг	1932
Ныда	66.63	полигональные	юг	1947
Новый Порт	67.68	полигональные	юг	1924
Антипаюта	69.08	полигональные	юг	1949
Тамбей	71.48	полигональные	север	1936
Марресаля	69.71	полигональные	север	1914
им. Попова	73.33	полигональные	север	1933

Параметры водно-теплового режима болот исследуемой территории были рассчитаны по упомянутой ранее модели. Модель основана на решении уравнений водного, радиационного и теплового баланса для разных элементов мезорельефа бугристых и полигональных болот.

Обобщение материалов расчета проводилось по двум периодам: с начала наблюдений указанных метеостанций до 1978 года (с 1936 года, n=42 года) и с конца этого периода по настоящее время (n=45 лет). Деление по 1978 году является оптимальным для разделения гидротермического режима болот на прошлый квазистационарный и нестационарный современный для исследуемой территории. При оценке результатов рассмотрены изменения температуры воздуха только в тёплый период, а не всего года, поскольку в холодный период промерзание деятельного слоя болот происходит весьма интенсивно и заканчивается не позднее середины зимы. В связи с этим остальные параметры водно-теплового режима болот тоже ограничены в оценке тёплым периодом (период года с устойчивыми среднесуточными температурами воздуха выше 0 °С).

С целью некоторой детализации при обобщении получаемых результатов обе зоны бугристых и полигональных болот были разделены на южный и северный районы. Кроме того, оценки результатов проводились отдельно для лет с эмпирическими обеспеченностями средней температуры воздуха тёплого периода в 2.5%, 50% и 97.5%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет обеспеченных значений температуры воздуха (Табл. 2) показывает, что за последние 45 лет наблюдается повышение средней температуры в тёплые периоды года, причем в более южных районах это повышение составляет 0.3-0.5 °С, тогда как в северных районах повышение составило от 0.7 до 1.6 °С (для годов 50% обеспеченности).

**Таблица 2.** Осреднённые данные повышения температуры воздуха за тёплые периоды до и после 1978 г. в зонах полигональных и бугристых болот Западной Сибири, °С.

**Table 2.** Averaged data on air temperature increase during warm periods before and after 1978 in the zones of polygonal and hummocky bogs of Western Siberia, °С.

Тип болот	Район	Обеспеченность		
		2.5%	50%	97.5%
зона полигональных болот	север	3.5	1.6	0.5
	юг	1.6	0.7	0.6
зона бугристых болот	север	1.5	0.3	- 0.7
	юг	1.4	0.5	- 0.3

Особенно интенсивно повышение температуры отмечается в наиболее тёплые годы (до 3.5 °С для годов 2.5% обеспеченности). В холодные годы повышение незначительно либо вовсе отсутствует. Такое повышение суммарной температуры теплых периодов определяет изменения составляющих водного и теплового баланса болот. Некоторые составляющие водно-теплового режима увеличиваются незначительно, такие как радиационный баланс и испарение. Изменение других составляющих будет зависеть от основного параметра – глубины оттаивания торфяной залежи болот. В связи с этим в данной статье рассмотрены изменения максимальной глубины оттаивания за тёплый период года на различных элементах микроландшафта бугристых и полигональных болот. В таблице 3 приведены результаты расчетов максимальных сезонных глубин оттаивания торфяной залежи болот на различных элементах микроландшафта.

**Таблица 3.** Максимальные глубины оттаивания болот зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири на конец тёплого периода, см.

**Table 3.** Maximum thawing depths of bogs in the permafrost zone of Western Siberia at the end of the warm period, cm.

Обеспеченность			Период до 1978 года			Период после 1978 года		
			2.5%	50%	97.5%	2.5%	50%	97.5%
бугристые болота	южная половина	бугры	60	52	43	69	56	47
		топи	80	70	61	88	74	65
	северная половина	бугры	55	46	38	64	50	41
		топи	74	63	54	83	68	59
полигональные болота	южная половина	полигоны	62	52	43	69	57	48
	северная половина	полигоны	41	33	25	57	45	31

В зоне полигональных болот оттаивание плоских полигонов и мочажин одинаково, поэтому приводятся средние значения параметров оттаивания. В этой зоне оттаивание в южной половине полигональных болот за последние 45 лет увеличилось в среднем на 4-5 см (около 10%), а в северной половине отмечается увеличение оттаивания почти в 2 раза. Наиболее существенные изменения прослеживаются в максимально теплые летние периоды, когда оттаивание за сезон увеличивается на 7-10 см (на севере до 16 см). В зоне бугристых болот глубина сезонного оттаивания увеличивается в среднем на 4-5 см, а в наиболее теплые годы – на 7-10 см.

Маршрутные обследования полигональных болот, выполненные в районе Бованенковского газового месторождения, показали, что мощность торфяной залежи здесь, как правило, меньше 30 см (в 97% случаев), и лишь в отдельных местах на полигонально-валиковых микроландшафтах она может достигать 80-100 см. Далее на север, в бассейне р. Пухуце-яха, мощность торфяной залежи не превышает 25 см. Поэтому в течение теплого периода года в северной половине зоны полигональных болот оттаивание происходит ежегодно, и, следовательно, повышение температуры воздуха в теплые периоды года не приведет к изменению их водно-теплового режима. Приводимые величины оттаивания для северного района полигональных болот следует рассматривать как «потенциальные».

Следует отметить, что некоторое увеличение оттаивания полигональных болот должно приводить к постепенному изменению структуры микроландшафтов, а возможно, и к некоторому смещению границ распространения основных типов болот. Следует предположить, что в первую очередь изменение коснется групп микроландшафтов. Так, плоскополигональные будут стремиться переходить в вогнутополигональные, а те, в свою очередь, в полигонально-валиковые и далее в полигонально-бугристые болота [Novikov, 2009]. Увеличение оттаивания на бугристых болотах будет приводить к увеличению площадей топей и к постепенной смене болотных комплексов бугристых болот на комплексы олиготрофных талых болот.

Вопрос о смещении современных границ болотных зон в северном направлении весьма сложный. Южная граница распространения мерзлых болот в настоящее время приблизительно совпадает с линией Сибирских Увалов. Однако и в 30-40 км южнее этой границы встречаются разрушающиеся бугристые структуры на наименее обводненных участках болот. Следует предположить, что переход к верховым типам талых болот ускорится. Сибирские Увалы, несмотря на относительно незначительные высоты (150-170 м в абсолютных отметках), все же являются некоторым препятствием для перехода мерзлых болот в талые. Поэтому, по нашему мнению, в ближайшей перспективе такого перехода не последует.

Граница между бугристыми и полигональными болотами имеет ширину около 70 км. Следует предположить, что она будет смещаться в северном направлении, однако скорость указанного смещения незначительна, поскольку рассматриваемый процесс требует формирования иной гидрографической сети болот, а также структурных изменений микроландшафтов. Кроме того, прогноз изменения границ болотных зон весьма затруднен на фоне продолжающегося изменения климата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге можно отметить, что изменения в некоторых элементах водно-теплового режима арктических болот на исследуемой территории, в первую очередь глубины сезонного оттаивания торфяной залежи, будут способствовать последовательной эволюции структуры болотных микроландшафтов. Процесс смещения границы между полигональными и бугристыми болотами в случае дальнейшего потепления будет ускоряться, однако этому могут воспрепятствовать орографические препятствия.

## ЛИТЕРАТУРА

Novikov S.M. (ed.) 2009. Hydrology of swamps in the permafrost zone of Western Siberia. VVM, Saint-Petersburg, 536 p. (in Russian). [Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. Санкт-Петербург: ВВМ. 536 с.].

Поступила в редакцию: 19.08.2024  
Переработанный вариант: 28.12.2024  
Принято в печать: 23.01.2025

*Научное издание*

# ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

*Том 16, выпуск 1/2025*

*Цена свободная*

*16+*

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-82594 от 18.01.2022 г.*

*Дата выхода в свет 18.04.2025*

*Адрес учредителей, редакции:  
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».  
Адрес: 628012, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра,  
г. Ханты-Мансийск ул. Чехова, 16.  
Тел./факс: +7(3467)37-70-00 (доб. 101); WEB: [www.ugrasu.ru](http://www.ugrasu.ru)*

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».  
Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36.  
Тел.: +7(3822)58-98-52, факс: +7(3822)52-95-85; WEB: [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)*

*ФГБУН "Институт водных и экологических проблем  
Сибирского отделения Российской Академии наук".  
Адрес: 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.  
Тел.: +7(3852)66-64-60, факс: +7(3852)24-03-96; WEB: [www.iwep.ru](http://www.iwep.ru)*

*ГКУ Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики».  
Адрес: 629008, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, 73.  
Тел./факс: +7(34922)441-32; WEB: [www.arctic.yanao.ru](http://www.arctic.yanao.ru)*

*Главный редактор:  
Глаголев Михаил Владимирович  
тел. +7-495-939-48-46  
E-mail: [m\\_glagolev@mail.ru](mailto:m_glagolev@mail.ru)*

*Заместитель главного редактора:  
Лапина Елена Дмитриевна  
тел. +7 (3467) 377-000 (доб. 313)  
E-mail: [e\\_lapshina@ugrasu.ru](mailto:e_lapshina@ugrasu.ru)*

