

ISSN 1997-1389 (Print)
ISSN 2313-5530 (Online)

**Журнал Сибирского
федерального университета
Биология**

**Journal of Siberian
Federal University
Biology**

2025 18 (3)

ISSN 1997-1389 (Print)
ISSN 2313-5530 (Online)

2025 18(3)

Издание индексируется Scopus (Elsevier), «Russian Science Citation Index» и «Zoological Record» на платформе «Web of Science» (Clarivate Analytics), Российским индексом научного цитирования (НЭБ), представлено в международных и российских информационных базах: Ulrich's periodicals directory, ProQuest, EBSCO (США), Google Scholar, Centre for Agriculture and Biosciences International (CABI), DOAJ, КиберЛенинка. Включено в список Высшей аттестационной комиссии «Рецензируемые научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования».

Журнал Сибирского федерального университета Биология

Journal of Siberian Federal University Biology

**Журнал Сибирского федерального университета. Биология.
Journal of Siberian Federal University. Biology.**

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ)

Главный редактор: *М.И. Гладышев*. Редактор *А.В. Прохоренко*.
Корректор *Т.Е. Бастрыгина*. Компьютерная верстка *Е.В. Гревцовой*

№ 3. 29.09.2025. Индекс: 42325. Тираж: 1000 экз.

Свободная цена

Адрес редакции и издательства:
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 24, ауд. 117.

Отпечатано в типографии Издательства БИК СФУ
660041 г. Красноярск, пр. Свободный, 82а.

*Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-28725 от 29.06.2007 г.,
выданное Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.*

<http://journal.sfu-kras.ru>

Подписано в печать 25.09.2025. Формат 60х90/8. Усл. печ. л. 12,4.
Уч.-изд. л. 11,9. Бумага тип. Печать офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 23376.

Возрастная маркировка в соответствии с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

CHIEF EDITOR

Michail Gladyshev, Corresponding Member of RAS, Professor, Institute of Biophysics SB RAS, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

SCIENCE EDITOR

Elena Kravchuk, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

EDITORIAL BOARD

- Sergey Bartsev, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Andrey Degermendzhy, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Nikolay Gaevsky, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
- Viktor Glupov, Institute of Systematics and Ecology of Animals SB RAS, Novosibirsk, Russia
- Malcolm Hughes, University of Arizona, Tucson, USA
- Mikhail Karpinsky, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia
- Valentina Kratasyuk, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
- John Lee, University of Georgia, Athens, USA
- Elena Muratova, Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Vitaliy Semenchenko, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Minsk, Belarus
- Nadezhda Sushchik, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Sabu Thomas, Mahatma Gandhi University, Kottayam, India
- Aristidis Tsatsakis, University of Crete, Heraklion, Greece
- Eugene Vaganov, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia
- Tatiana Volova, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Egor Zadereev, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

GUEST EDITORS OF SPECIAL ISSUE

- Denis Rogozin, Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia
- Dmitry Subetto, Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg, Russia

CONTENTS

Denis Yu. Rogozin, Dmitry A. Subetto Editors's Preface	271
Alexandra A. Golyeva, Dmitry A. Subetto, Nikita S. Mergelov, Alexander V. Orlov, Stefania Dzini and Nikita V. Khokhlov On the Composition of a "Pink Horizon" in Varved Clays of the Onega Ice Lake.....	272
Elena S. Kolpakova, Galina N. Losyuk, Natalia M. Kokryatskaya, Anna V. Velyamidova and Elena A. Vakhrameeva Sulfur and Chlorine Compounds in Water and Bottom Sediments of Meromictic Lakes of the White Sea and Barents Sea Basins	285
Maria A. Pupysheva, Tatiana A. Blyakharchuk Reconstruction of the Dynamics of Fires in the Southern Taiga Subzone of Western Siberia from the Late Glacial to the Present Based on Bottom Sediments of Lake Shchuchye.....	303
Vladimir V. Zykov, Aleksandr O. Bulkhin, Elena V. Bezrukova and Aleksandr A. Shchetnikov Carotenoids in Bottom Sediments as Biomarkers of Changes in the Ecosystem of Saline Lake Shira (Siberia, Khakassia)	316
Anna V. Maslennikova Diatom Assemblages in Lake Turgoyak Sediments: The Lake Ecosystem's Response to Holocene Climate Change	327
Niyaz M. Nigmatullin, Larisa A. Frolova and Yan T. Shneidman Abiotic Factors Influencing the Formation of Recent Cladocera Community Structures in Tundra Lakes in the Pechora River Delta (Nenets Autonomous Okrug).....	347
Natalya Yu. Zharinova, Galina Yu. Yamskikh and Darya E. Makarchuk Reconstruction of Final Late Pleistocene and Holocene Paleogeographic Conditions in the Middle Yenisei Valley Based on a Comprehensive Analysis of Sediments from the First Floodplain Terrace of the Berezovka River	365
Anna V. Grenaderova, Anastasia A. Knorre, Georgiy E. Ponomarev, Daria A. Kuznetsova, Anna V. Gireva, Anna E. Barabantsova, Dana Yu. Pavlova, Alexandra B. Mikhailova, Olga V. Podobueva and Irina P. Filippova Reconstructing Holocene Paleoenvironments in the Eastern Sayan Foothills: Multi-Proxy Peat Record from the Bolshoy Inzhul Mire (Krasnoyarskie Stolby National Park, Russia).....	389

СОДЕРЖАНИЕ

Д. Ю. Рогозин, Д. А. Субетто От редакторов: вступительное слово	271
А. А. Гольева, Д. А. Субетто, Н. С. Мергелов, А. В. Орлов, С. Дзини, Н. В. Хохлов К вопросу о составе «розового горизонта» в ленточных глинах Онежского приледникового озера	272
Е. С. Колпакова, Г. Н. Лосюк, Н. М. Кокрятская, А. В. Вельямидова, Е. А. Вахрамеева Соединения серы и хлора в воде и донных осадках меромиктических озер бассейнов Белого и Баренцева морей	285
М. А. Пупышева, Т. А. Бляхарчук Реконструкция динамики пожаров в южнотаежной подзоне Западной Сибири с позднеледникового до современности (на примере отложений озера Цучье)	303
В. В. Зыков, А. О. Бульхин, Е. В. Безрукова, А. А. Щетников Каротиноиды в донных отложениях как биомаркеры изменений в экосистеме соленого озера Ши́ра (Сибирь, Хакасия)	316
А. В. Масленникова Диатомовые комплексы донных отложений озера Тургояк: ответ озерной экосистемы на изменения климата в голоцене	327
Н. М. Нигматуллин, Л. А. Фролова, Я. Т. Шнейдман Влияние абиотических факторов на формирование структуры рецентных сообществ Cladocera ряда тундровых озер Малоземельской тундры	347
Н. Ю. Жаринова, Г. Ю. Ямских, Д. Е. Мака́рчук Реконструкция палеогеографических условий финала позднего плейстоцена и голоцена в долине Среднего Енисея на основе комплексного анализа отложений первой надпойменной террасы р. Березовка	365
А. В. Гренадерова, А. А. Кнорре, Г. Е. Пономарев, Д. А. Кузнецова, А. В. Гирева, А. Е. Барабанцова, Д. Ю. Павлова, А. Б. Михайлова, О. В. Подобуева, И. П. Филиппова Палеоэкологические условия в низкогорье Восточного Саяна в голоцене: по данным изучения болота в верховье р. Большой Инжул на территории национального парка «Красноярские Столбы»	389

От редакторов: вступительное слово

Палеолимнология – современная междисциплинарная область знаний, основанная на исследовании донных отложений озер с целью реконструкции их истории и прошлых ландшафтно-климатических изменений, а также выявления различного рода природных событий и антропогенных воздействий на озёра и окружающие их территории. На территории Сибири палеолимнологические исследования проводятся уже достаточно давно в нескольких научных центрах, и ими достаточно полно охвачены районы Западной Сибири, Алтае-Саянской горной области, Прибайкалья и Забайкалья, Крайнего Севера и Якутии. Однако в районах, прилегающих к р. Енисей, палеолимнологические исследования очень немногочисленны, несмотря на обилие здесь перспективных неизученных объектов – озер различных типов, как пресных, так и соленых.

В г. Красноярске палеолимнологические исследования начались относительно недавно под руководством д.б.н. Д. Ю. Рогозина, и к настоящему времени сформировалась оригинальная научная школа, применяющая методы газовой и жидкостной хроматографии к анализу биохимических молекулярных маркеров в донных отложениях. Молекулярные биомаркеры являются одним из новейших и перспективных направлений в палеолимнологии, поэтому не случайно г. Красноярск был выбран местом очередной, 6-й по счету конференции «Палеолимнология Северной Евразии». Конференция проводится раз в два года на площадках научных и образовательных учреждений нашей страны по очереди в европейской и азиатской частях (Петрозаводск, 2014; Якутск, 2016; Казань, 2018; Иркутск, 2020 (дистанционно); Санкт-Петербург, 2022). В данный спецвыпуск вошли статьи, написанные по результатам исследований, представленных на 6-й Международной конференции и Школе молодых ученых «Палеолимнология Северной Евразии», состоявшейся 25–29 августа 2024 г. в г. Красноярске на базе Сибирского федерального университета.

Шестая международная палеолимнологическая конференция была организована Сибирским федеральным университетом, Институтом биофизики СО РАН (обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр» СО РАН (Красноярск) и РГПУ им. А. И. Герцена (Санкт-Петербург) совместно с Институтом лимнологии СО РАН (Иркутск), Институтом географии РАН (Москва), Институтом озероведения (обособленное подразделение ФИЦ «Санкт-Петербургский научный центр РАН»), Санкт-Петербургским государственным университетом, Северо-Восточным федеральным университетом им. М. К. Аммосова (Якутск), Казанским (Приволжским) Федеральным университетом (Казань), Русским географическим обществом (Палеолимнологическая комиссия Санкт-Петербургского отделения РГО).

На конференции представлено 114 докладов учеными из различных научно-исследовательских институтов и университетов Российской Федерации, а также из Испании и Китая. В ходе конференции участники поделились новейшими результатами своих исследований, а молодые ученые в рамках Школы ознакомились с хроматографическими методами анализа биомаркеров, а также с оригинальными методами неразрушающего пробоотбора, развиваемыми в Красноярском научном центре.

Следующая седьмая международная палеолимнологическая конференция состоится в августе 2026 г. в г. Апатиты на базе Кольского научного центра РАН.

Д. Ю. Рогозин, Д. А. Субетто

EDN: QPCWSQ

УДК 551.332.26

On the Composition of a “Pink Horizon” in Varved Clays of the Onega Ice Lake

Alexandra A. Golyeva^a, Dmitry A. Subetto^{b*},
Nikita S. Mergelov^a, Alexander V. Orlov^b,
Stefania Dzini^c and Nikita V. Khokhlov^c

^a*Institute of Geography RAS
Moscow, Russian Federation*

^b*Herzen State Pedagogical University of Russia
Saint Petersburg, Russian Federation*

^c*Miklouho-Maclay Institute of Ethnology and Anthropology RAS
Moscow, Russian Federation*

Received 25.03.2025, received in revised form 28.07.2025, accepted 3.09.2025

Abstract. The present study reports results of the microscopic and geochemical examination of the structure and composition of the “pink horizon” in varved clays of the Onega Ice Lake. This is a stratigraphically consistent marking horizon extending across the entire area of the Onega Ice Lake waters, which is dated to approximately 13,300–13,200 calibrated years ago. The origin and the structure of this horizon remain a matter of debate. The research was conducted on Lake Polevskoye, at the Zaonezhsky Peninsula, which is located in the Republic of Karelia. From the sediment core N 125, 18 samples were collected at 0.5 cm intervals for analysis (depth 9.64–9.84 m – “pink horizon” in varved clays of the Onega Ice Lake). A JEOL 6610LV scanning electron microscope (SEM) and an INCAx-act (MAN) microanalyzer were used. Raman spectra were acquired directly from the Fe-containing particles and films on a Renishaw inVia Reflex microspectrometer equipped with 532 nm and 785 nm lasers using a 50x objective with 0.5 numerical aperture. Data collection time ranged from 10 to 180 sec per measurement. For black C-rich particles, we used a 532 nm laser set to 5–10 mW power and 10 sec of acquisition time. A large amount of iron was found in the form of small crystals and amorphous films on the surface of various particles. The presence of biogenic structures within the samples exclusively in the form of microbial mats and biofilms suggests relatively rapid sedimentation and accumulation processes. Microbial mats and biofilms may develop in deep water even at a depth of 100 m and deeper. In deep-water environments, the composition of the microbial community may change, with photoautotrophs being replaced by chemoautotrophs. A conclusion has been made about

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: subetto@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1162-3321 (Golyeva A.); 0000-0002-3585-8598 (Subetto D.); 0000-0001-5796-5960 (Mergelov N.); 0000-0001-9726-0471 (Orlov A.); 0000-0002-7288-9422 (Dzini S.)

the high rate of accumulation of varved clays. The current study shows that the “pink horizon” has internal heterogeneity (fine layering), which averages the obtained geochemical spectra and makes it impossible to distinguish concentrations of individual elements.

Keywords: iron, scanning electron microscope, Raman spectra, microanalyzer, microbial mats, varved clays, “pink horizon”, Onega Ice Lake.

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Scientific Foundation #24–17–00206, <https://rscf.ru/project/24–17–00206>.

Citation: Golyeva A. A., Subetto D. A., Mergelov N. S., Orlov A. V., Dzini S., Khokhlov N. V. On the composition of a “pink horizon” in varved clays of the Onega Ice Lake. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 272–284. EDN: QPCWSQ



К вопросу о составе «розового горизонта» в ленточных глинах Онежского приледникового озера

**А. А. Гольева^а, Д. А. Субетто^б, Н. С. Мergелов^а,
А. В. Орлов^б, С. Дзини^в, Н. В. Хохлов^в**

*^аИнститут географии РАН
Российская Федерация, Москва*

*^бРоссийский государственный педагогический университет
им. А. И. Герцена*

Российская Федерация, Санкт-Петербург

*^вИнститут этнологии и антропологии
им. Миклухо-Маклая РАН
Российская Федерация, Москва*

Аннотация. В работе приводятся результаты микроскопического и геохимического исследования образцов из «розового горизонта» в ленточных глинах Онежского приледникового озера. Этот горизонт представляет собой стратиграфически выдержанный маркирующий горизонт в озерно-ледниковых отложениях Онежского приледникового озера и датируется примерно 13300–13200 калиброванных лет назад. Происхождение и структура этого горизонта остаются предметом дискуссий. Исследования проводились на Полевском озере, расположенном на Заонежском полуострове в Республике Карелия. Из керна N 125, представленного ленточными глинами Онежского приледникового озера, было изучено 18 проб, отобранных с интервалом 0,5 см (глубина 9,64–9,84 м – «розовый горизонт» в ленточных глинах). Использовался электронный сканирующий микроскоп (СЭМ) JEOL 6610LV. Для уточнения химического состава отдельных частиц использовали микроанализатор INCAx-act (MAp). Спектры комбинационного рассеяния (рамановские спектры) были получены непосредственно от Fe-содержащих частиц и пленок на микроспектрометре Renishaw inVia Reflex, оснащенном лазерами с длиной волны 532 нм

и 785 нм, с использованием объектива 50х с числовой апертурой 0,5. Время сбора данных составляло от 10 до 180 секунд на одно измерение. Для черных частиц с высоким содержанием углерода мы использовали лазер с длиной волны 532 нм, мощностью 5–10 мВт и время сбора данных 10 с. Обнаружено большое количество железа в виде мелких кристаллов и аморфных пленок на поверхности разных частиц. Впервые выявлено присутствие в «розовом горизонте» микробных матов и биопленок, которые могли формироваться на глубинах 100 м и глубже. На больших глубинах могла происходить смена микробного сообщества от фотоавтотрофов к хемоавтотрофам. Сделан вывод о высоких скоростях накопления ленточных глин. Показано, что «розовый горизонт» имеет внутреннюю неоднородность (тонкую слоистость), что усредняет получаемые геохимические спектры и не позволяет выделять концентрации отдельных элементов.

Ключевые слова: железо, электронный сканирующий микроскоп, рамановский спектр, микроанализатор, микробные маты, ленточные глины, «розовый горизонт», Онежское приледниковое озеро.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24–17–00206, <https://rscf.ru/project/24–17–00206>.

Цитирование: Гольева А. А. К вопросу о составе «розового горизонта» в ленточных глинах Онежского приледникового озера / А. А. Гольева, Д. А. Субетто, Н. С. Мержелов, А. В. Орлов, С. Дзини, Н. В. Хохлов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 272–284. EDN: QPCWSQ

Введение

Во многих регионах земного шара, преимущественно Северного полушария, фиксируется слой в четвертичных отложениях, имеющий повышенное содержание химических элементов «импактного» генезиса (Ni, Cr, Cu и элементы платиновой группы Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) (Андроников и др., 2014). Возраст этого «импактного» горизонта во всех отложениях сходен и составляет порядка 12,9–12,7 тыс. лет назад. Среди гипотез, объясняющих генезис слоя, значительное место занимает космогенная гипотеза – слой отражает результат метеоритного удара на Землю (Bunch et al., 2012; Wittke et al., 2013; Kinzie et al., 2014; Андроников et al., 2018; Moore et al., 2020 и др.). Считается, что крупный болид взорвался над Лаврентийским ледниковым щитом Северной Америки (Андроников и др., 2014). В основном геохимические и минералогические признаки

возможного метеоритного удара в виде «розового горизонта» находят в озёрных и болотных отложениях, а также в почвах (Andronikov et al., 2018; Mahaney et al., 2018; Pino et al., 2019; Powell, 2022). Именно итогом метеоритного удара объясняется резкое глобальное похолодание климата в позднем дриасе, повлекшее исчезновение мегафауны (Firestone et al., 2007; Pino et al., 2019; Powell, 2022). В ряде статей в качестве следов «импакта 12800» приводятся сфероиды разного химического состава, среди которых упоминаются фрамбоиды (Pino et al., 2019), то есть органо-минеральные образования.

В отложениях Онежского приледникового озера – ленточных глинах, обнаруживается прослой, называемый «розовым горизонтом» (Демидов, 2004, 2006; Палеолимнология Онежского озера..., 2022; Hang et al., 2019), поскольку он имеет красноватый оттенок, что выделяет его среди вмещающих серова-

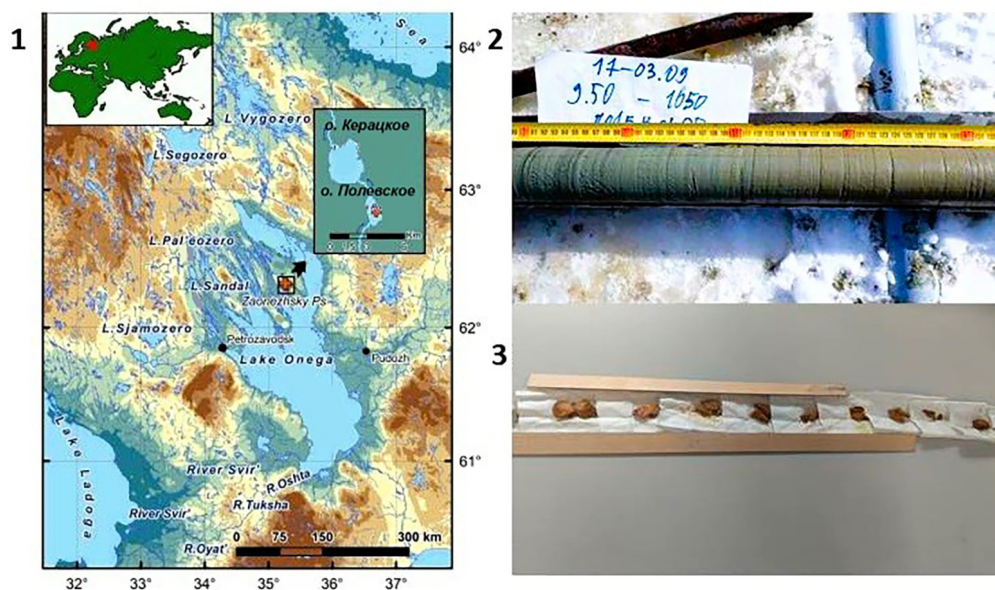


Рис. 1. 1 – географическое положение озера Полевское; 2 – изучаемый фрагмент керна донных отложений с «розовым горизонтом» до начала работ; 3 – изучаемый фрагмент керна донных отложений с «розовым горизонтом» после обработки 30 % H_2O_2

Fig. 1. 1 – geographical location of Lake Polevskoye; 2 – the part of the sediment core with the “pink horizon” prior to the study procedures; 3 – the part of the sediment core with the “pink horizon” after treatment with 30 % H_2O_2

тых ленточных глин (рис. 1). Происхождение и специфика этого горизонта остаются предметом дискуссий (Демидов, 2004; Палеолимнология Онежского озера..., 2022). В образцах из этого горизонта ранее определялся в основном геохимический состав. Каких-либо органических или органо-минеральных соединений в «розовом горизонте» не обнаружено (Демидов, 2004; Палеолимнология Онежского озера..., 2022).

«Розовый горизонт» является стратиграфически выдержанным маркирующим слоем в озерно-ледниковых отложениях (ленточные глины) Онежского приледникового озера, датируемым примерно 13300–13200 калиброванных лет назад (Hang et al., 2019), который, согласно гипотезе автора статьи Д. А. Субетто, может быть связан с «импактом» 12800 лет назад.

Целью исследования было получение новых данных о химическом составе «розового

горизонта» в ленточных глинах и выявление каких-либо его специфических черт с использованием различных микроскопических техник.

Объекты исследования

Исследования проводились на Полевском озере, расположенном на Заонежском полуострове (котловина которого в прошлом заливалась водами Онежского приледникового озера (ОПО)) в Республике Карелия (рис. 1.1). Отбор колонки донных отложений был произведен в точке с глубиной воды 2,2 м ($62,3094^\circ$ с.ш., $35,2831^\circ$ в.д.) в зимнее время со льда при помощи торфяного бура (длина пробоотборной части 1 м, диаметр 5 см). Керны донных отложений на месте в полевых условиях фотографировались, кратко описывались и упаковывались в половинки ПВХ-труб длиной 1 м и завертывались в полиэтилен с последующей транспортировкой в лабора-

торию Рационального природопользования факультета географии РГПУ им. А.И. Герцена. Общая мощность вскрытого разреза донных отложений составила 11 м. Из керна донных отложений N 125 (9,50–10,50 м от поверхности льда), представленных ленточными глинами Онежского приледникового озера, были отобраны и изучены 18 проб. Пробы отбирались с интервалом 0,5 см (глубина 9,64–9,84 м – «розовый горизонт»), то есть общая длина изученного отрезка составляла 18 см (рис. 1.2). Образцы были пронумерованы от 1 (глубина 9,66 м) до 18 (глубина 9,84 м).

В дальнейшем все обсуждения полученных результатов будут относиться к этому отрезку керна.

Методы

В исследовании образцов донных отложений ОПО использовались два типа микроскопии: электронная и рамановская. Для работы на электронном сканирующем микроскопе образцы донных отложений обрабатывали 30 % перекисью водорода (30 % H_2O_2) при комнатной температуре (+21–23 °C) с последующим нагревом в муфельной печи до температуры 450 °C. Это входит в протокол стандартной пробоподготовки с целью удаления органо-минеральных соединений и диспергирования пробы. В работе использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL 6610LV (JEOL, Япония). Наиболее характерные и часто встречающиеся частицы были сфотографированы. Для уточнения химического состава отдельных частиц использовали микроанализатор INCAx-act (MAn) (Oxford Instruments, Великобритания).

Рамановские спектры (спектры комбинационного рассеяния) были получены на микроспектрометре Renishaw inVia Reflex (Великобритания). В качестве источников возбуждения использовали лазеры с длинами

волн $\lambda=532$ нм и $\lambda=785$ нм. Фокусировку лазера на поверхности образца проводили при помощи объектива с 50-кратным увеличением и числовой апертурой 0,5. При исследовании микрочастиц оксидов железа мощность лазера поддерживалась ниже 0,5 мВт, чтобы избежать нагрева образца и возможных изменений в его химической структуре. Использовался статический режим сканирования, время экспозиции составляло от 10 до 20 секунд, количество накоплений – от 1 до 20 на каждое измерение. Для темноцветных частиц с высоким содержанием углерода использовали лазер с $\lambda=532$ нм при мощности 5–10 мВт, время экспозиции составляло 10 секунд в режиме расширенного сканирования, количество накоплений – 10 на каждое измерение.

Работы были выполнены в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН.

Геохимические спектры были получены методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборах МЕТАЛЛТЕСТ (MT-169) и ЭКРОС XRF-9700 в Институте этнологии и антропологии им. Миклухо-Маклая РАН.

Результаты и обсуждение

Электронная сканирующая микроскопия

Все изученные образцы (18 шт.) исходно имели преимущественно сероватую окраску, характерную для озерно-ледниковых ленточных глин. Розовый оттенок центральной части изучаемой колонки N 125 был выражен слабо. После обработки перекисью водорода с последующим нагреванием основная (центральная) часть образцов приобрела интенсивный красный цвет, в то время как цветность периферийных образцов практически не изменилась (рис. 1.3).

Просмотр образцов под электронным микроскопом показал, что в образцах централь-

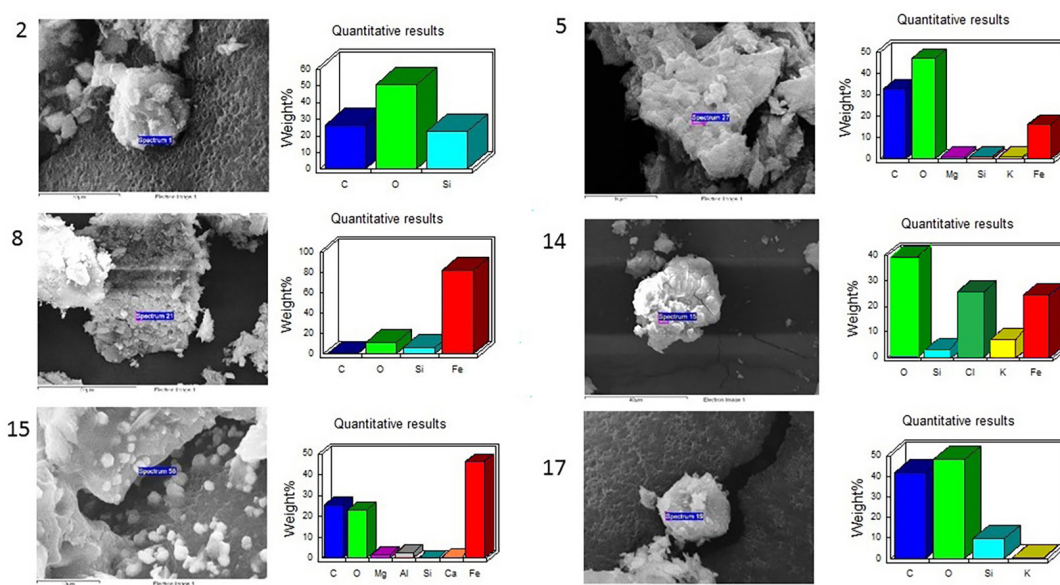


Рис. 2. Микрофотографии минеральных частиц из «розового горизонта» и их химический состав. Цифрами показан порядковый номер образца

Fig. 2. Microphotographs of mineral particles from the “pink horizon” and their chemical composition. The numbers indicate the sample serial number

ной части «розового горизонта» присутствует большое количество мелких (2–3 микрона) кристаллов оксида железа (рис. 2).

За счет использования микроанализатора удалось установить, что в этих образцах железо присутствует не только в виде отдельных минералов, но и составляет железистые пленки, покрывающие все частицы. Содержание железа на поверхности частиц неоднородно – варьирует от 1 до 80 весовых % относительно других химических элементов, составляя в среднем 25–30 %. Помимо железа в составе пленок встречаются следующие химические элементы в разных количествах: Al, Mg, K, Ca, C, Si. Их разнообразие представлено на графиках рис. 2.

Анализ не выявил каких-либо органических минеральных частиц, типичных для озерных осадков (цист водорослей, панцирей диатомовых водорослей, фрамбоидов, спикул губок). В то же время многие глинистые частицы были полностью покрыты микробными ма-

тами и/или пленками. Эти пленки, как и минеральные частицы в «розовом горизонте», были покрыты тонким налетом соединений железа, что, видимо, способствовало их сохранности (рис. 3).

Микробные маты и биопленки могут развиваться в глубокой воде даже на глубине 100 м и глубже (Andersen et al., 2011; Greco et al., 2020). В глубоководных средах состав микробного сообщества может меняться от фотоавтотрофов к хемоавтотрофам. Например, в отложениях озера Байкал, включая его глубоководные части, обнаружены микроорганизмы с разнообразными метаболическими стратегиями (Zemskaya et al., 2021).

Рамановская микроскопия

В образцах озерных отложений выявлено наличие частиц оксида железа размером от десятков до сотен микрометров, которые были рассеяны в матрице из силикатных минералов. В рамановских спектрах

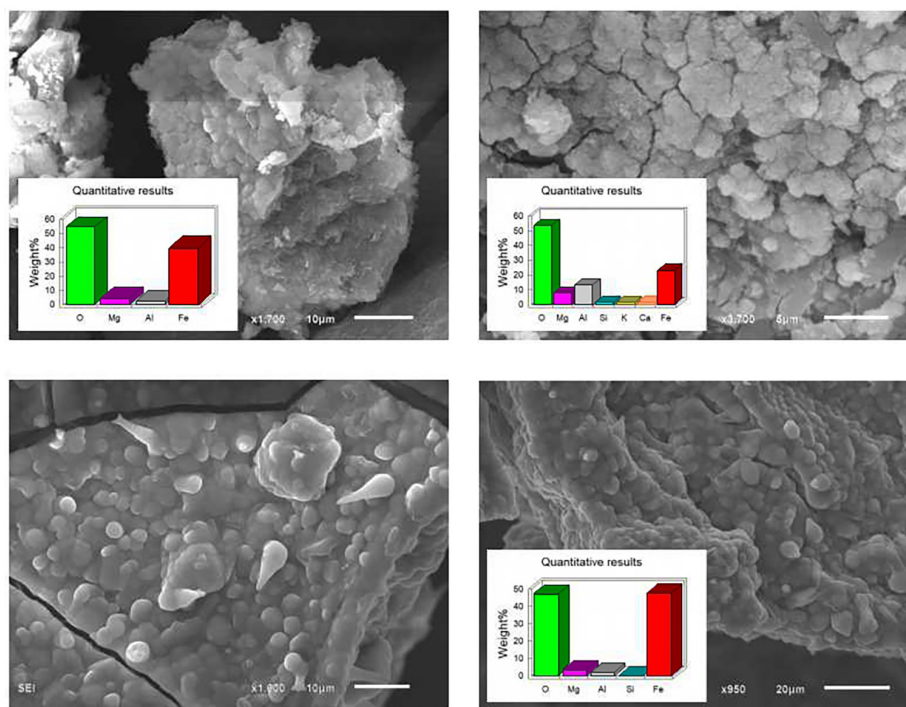


Рис. 3. Микробные маты на поверхности глинистых частиц и их химический состав

Fig. 3. Microbial mats on the surface of clay particles and their chemical composition

частиц (рис. 4) присутствовали следующие полосы характерные для гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$): при $224\text{--}225\text{ см}^{-1}$ с плечом при $245\text{--}246\text{ см}^{-1}$, $291\text{--}295\text{ см}^{-1}$ и $407\text{--}408\text{ см}^{-1}$ (Hanesch, 2009), а также при 608 см^{-1} и 1315 см^{-1} . При исследовании мелких частиц оксида железа размером в десятки микрон спектры часто включали полосы, характерные для силикатов, например, кварца с отчетливым пиком при 464 см^{-1} и слабыми пиками при 264 см^{-1} и 356 см^{-1} .

Проанализированные образцы также содержали темноцветные микрочастицы, преимущественно в виде хлопьев. Их рамановские спектры (рис. 5) характерны для sp^2 углеродов со значительным вкладом разупорядоченной фазы. Присутствовали две полосы первого порядка: G полоса при $\sim 1580\text{ см}^{-1}$, связанная с колебаниями атомов C в графеновых структурах, и D полоса при $\sim 1350\text{ см}^{-1}$, указывающая на дефекты ароматической структуры

и наличие разупорядоченной фазы, а также пики второго порядка (наиболее выраженный при $\sim 2700\text{ см}^{-1}$). Предположительным источником высокоуглеродистых темноцветных микрочастиц являются продукты выветривания метаморфических пород – шунгитов, залегающих в $30\text{--}40\text{ км}$ к северу от Полевского озера. Полученные рамановские спектры согласуются с таковыми для шунгита (Chazhengina & Kovalevski, 2017).

Геохимические исследования

Содержание и распределение 15 химических элементов показано в табл. 1. Ряд элементов (Ag, Hf, Le, Ni, P, Pd, Re, S, Sb, Se, Sn, Ta, W) имели нулевые значения и в таблице отсутствуют, хотя они также определялись. Содержание разных элементов варьирует. Больше всего в образцах кремния ($61,9\text{--}69,5\%$). Железо среди этих элементов находится на третьем

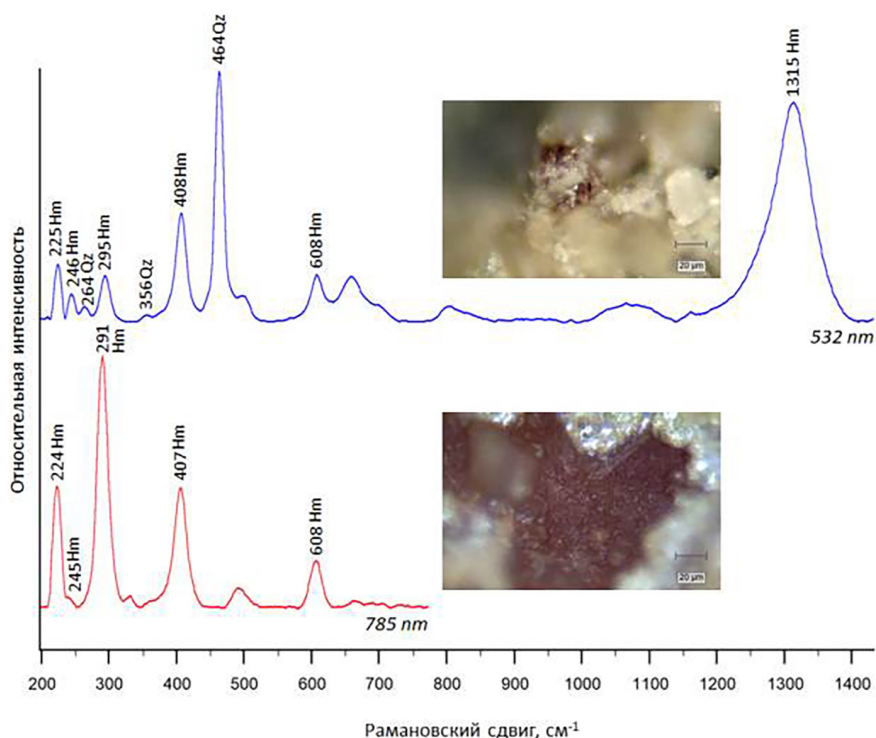


Рис. 4. Рамановские спектры частиц оксида железа в отложениях «розового горизонта»; представлены гематитом ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), рассеянным в силикатной матрице. Hm – гематит; Qz – кварц; источники возбуждения $\lambda=532$ nm и $\lambda=785$ nm

Fig. 4. Raman spectra of iron oxide particles in sediments of the “pink horizon”; represented by hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dispersed in a silicate matrix. Hm – hematite; Qz – quartz; excitation sources $\lambda=532$ nm and $\lambda=785$ nm

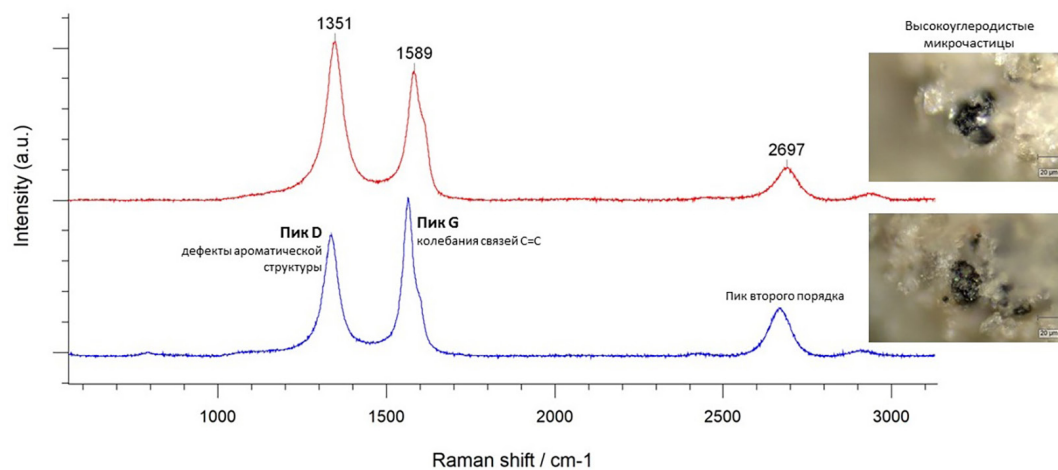


Рис. 5. Рамановские спектры высокоуглеродистых темноцветных частиц в отложениях «розового горизонта» (источник возбуждения $\lambda=532$ nm)

Fig. 5. Raman spectra of high-carbon dark-colored particles in sediments of the “pink horizon” (excitation source $\lambda=532$ nm)

Таблица 1. Озеро Полевское. Химический состав (%) образцов из «розового горизонта», керн N 125, глубина 9,64–9,84 м
Table 1. Lake Polevskoye. Chemical composition (%) of samples from the “pink horizon”, core N 125, depth 9.64–9.84 m

Глубина, см	Al	Bi	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Si	Ti	V	Zn	Zr
0,5–1,0	15,971	0,12	0,153	0,025	0,016	11,528	2,214	0,171	0,078	0,069	68,592	0,919	0,048	0,026	0,068
1,5–2,0	16,306	0,131	0,149	0,027	0,014	12,301	2,842	0,176	0,086	0,07	66,667	1,046	0,069	0,031	0,081
2,5–3,0	16,375	0,101	0,125	0,019	0,013	10,332	2,249	0,157	0,058	0,055	69,517	0,87	0,038	0,024	0,061
3,5–4,0	16,617	0,145	0,196	0,037	0,018	13,722	1,154	0,209	0,091	0,1	66,447	1,071	0,064	0,034	0,092
4,5–5,0	16,681	0,152	0,179	0,021	0,015	13,192	2,778	0,19	0,097	0,09	65,378	1,029	0,069	0,037	0,087
5,5–6,0	16,579	0,117	0,137	0,017	0,015	11,052	1,449	0,172	0,064	0,065	69,271	0,89	0,079	0,03	0,074
6,5–7,0	16,609	0,136	0,178	0,031	0,017	13,312	3,36	0,199	0,08	0,085	64,79	1,027	0,062	0,034	0,077
7,5–8,0	17,445	0,129	0,19	0,023	0,014	13,114	2,462	0,193	0,063	0,064	65,122	0,982	0,093	0,031	0,068
10,5–11,0	16,988	0,138	0,175	0,031	0,022	14,05	3,047	0,19	0,088	0,082	63,904	1,096	0,069	0,032	0,081
11,5–12,0	16,812	0,144	0,167	0,024	0,018	13,851	1,241	0,206	0,092	0,084	66,129	1,034	0,066	0,039	0,086
12,5–13,0	16,438	0,148	0,178	0,026	0,02	13,453	2,4	0,206	0,102	0,093	65,611	1,143	0,058	0,034	0,085
13,5–14,0	17,189	0,113	0,147	0,02	0,017	11,464	2,268	0,18	0,068	0,07	67,372	0,934	0,077	0,025	0,069
14,5–15,0	17,292	0,105	0,145	0,013	0,015	11,867	2,272	0,186	0,062	0,05	66,837	1,002	0,08	0,026	0,061
15,5–16,0	16,977	0,122	0,154	0,03	0,014	12,682	2,282	0,192	0,073	0,071	66,187	1,027	0,079	0,033	0,072
16,5–17,0	16,42	0,176	0,193	0,017	0,022	16,023	3,309	0,239	0,105	0,088	61,987	1,191	0,085	0,046	0,095
17,5–18,0	17,7	0,117	0,147	0,026	0,014	11,883	2,612	0,181	0,07	0,066	66,066	0,937	0,074	0,03	0,073

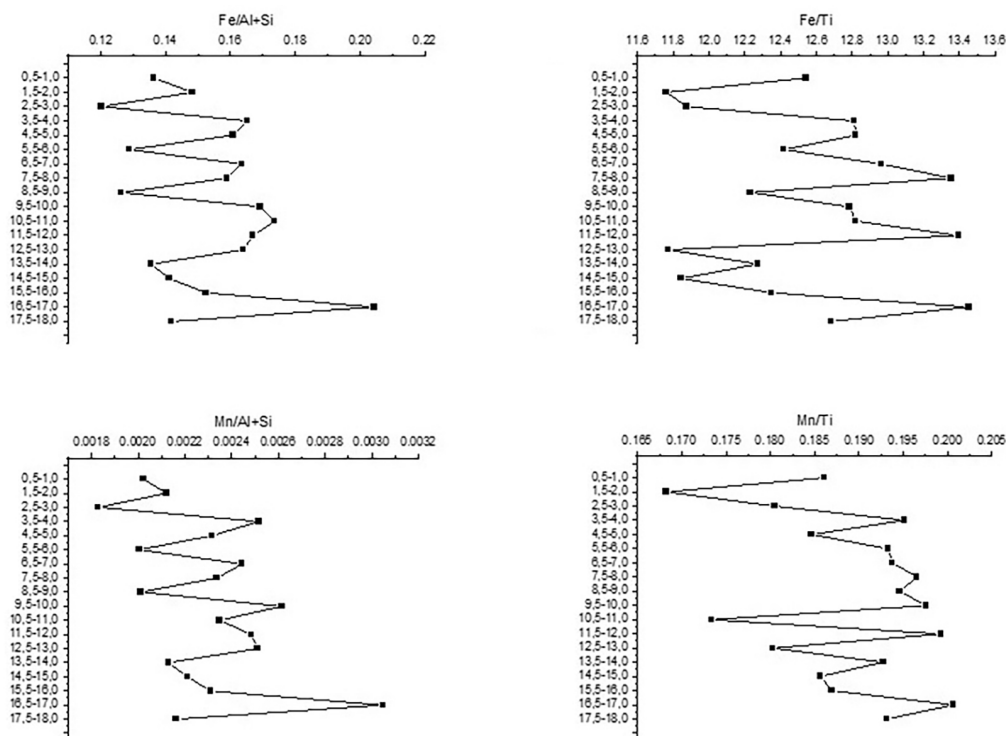


Рис. 6. Графики изменчивости геохимических индексов в пределах «розового горизонта»

Fig. 6. Graphs of variability of geochemical indices within the "pink horizon"

месте (10,3–16,0 %) после алюминия (15,9–17,7 %). Какой-либо концентрации любого из химических элементов в центральной части исследованной колонки не выявлено.

Для более точной картины распределения элементов была сделана серия графиков распределения основных химических элементов (рис. 6). Все полученные графики имели «пилообразный» характер с тенденцией уменьшения содержания железа и марганца в «розовом горизонте» от нижней его части к верхней. Подобный характер распределения элементов указывает на неоднородность всей исследуемой части керна. Очевидно, тонкая слоистость ленточных глин, которая не была учтена нами при отборе проб, создавала за счет перемешивания при пробоподготовке усредненный химический состав образца, что отразилось в полученных результатах.

Заключение

Изменение окраски образцов донных отложений из «розового горизонта» после обработки перекисью водорода связано с наличием в них значительных концентраций железа. Это независимо подтверждается данными, полученными с помощью микроанализатора. Формы соединений железа представлены мелкими кристаллами и аморфными пленками на поверхностях других минеральных частиц в осадке. Образцы, которые не изменили свою окраску после обработки перекисью водорода, каких-либо форм железа (кристаллы, пленка) не имели.

Рамановские спектры свидетельствуют о вкладе графита и других типов термически зрелого углерода, вероятно, геологического происхождения (например, углерода метаморфических пород – шунгита).

Итогом работы стала фиксация в образцах биогенных форм, представленных исключительно в виде микробных матов и биопленок во всех изученных образцах. Это не только существенно расширяет и дополняет наши знания об особенностях строения и состава «розового горизонта», но позволяет делать выводы о скоростях накопления ленточных глин. Отсутствие других органо-минеральных форм жизни указывает на относительно быстрые процессы накопления минеральных осадков, не позволявшие появиться/сохраниться более сложным органическим формам, например, фрамбоидам, диа-томовым водорослям и пр.

Таким образом,

– впервые выявлены следы микробной деятельности (микробные маты и пленки) в ленточных глинах Онежского приледникового озера, показывающие, что осадконакопление в озерно-приледниковых условиях могло протекать импульсно с периодами затишья, достаточными для формирования микробных матов на дне;

– показано, что импульсивный тип формирования отложений «розового горизонта» создает иной (тонкослоистый) характер отложений относительно осадконакопления в периоды затишья, что в конечном итоге влияет на результаты геохимических исследований, не позволяя выявить геохимическую специфику горизонта;

– результаты исследования показали, что «розовый горизонт» в ленточных глинах Онежского приледникового озера имеет более высокое содержание железа по сравнению с ниже- и вышележащими слоями. Этот факт, а также стратиграфическая выдержанность «розового горизонта» (в верхней части разреза ленточных глин с мощностью примерно 15–20 см) с отчетливой, контрастной по смене окраски от серой к «розовой» нижней границей «горизонта» и постепенной верхней границей может указывать на внешнее поступление железа в виде пыли. Это требует дополнительных исследований, в частности изучения источников осадочного вещества (напр. Страховенко и др., 2025a, 2025b).

Список литературы / References

Андроников А. В., Субетто Д. А., Лауретта Д. С., Андроникова И. Е., Дросенко Д. А., Кузнецов Д. Д., Сапелко Т. В., Сырых Л. С. (2014) Поиск следов метеоритного удара: особенности распределения микроэлементов в позднеплейстоценовых осадках оз. Медведовское (Карельский перешеек, Россия). *Доклады Академии наук*, 457(1): 69–73 [Andronikov A. V., Subetto D. A., Lauretta D. S., Andronikova I. E., Drosenko D. A., Kuznetsov D. D., Sapelko T. V., Syrykh L. S. (2014) In search for fingerprints of an extraterrestrial event: trace element characteristics of sediments from the lake Medvedevskoye (Karelian Isthmus, Russia). *Doklady Earth Sciences*, 457(1): 819–823]

Демидов И. Н. (2004) Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье. *Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7*. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, с. 207–218 [Demidov I. N. (2004) Bottom sediments and level fluctuations of Lake Onega in the late glacial period. *Geology and mineral resources of Karelia. Issue 7*. Petrozavodsk, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, p. 207–218 (in Russian)]

Демидов И. Н. (2006) О выделении маркирующего горизонта в донных отложениях Онежского приледникового озера. *Доклады Академии наук*, 407(2): 217–220 [Demidov I. N. (2006) Identification of marker horizon in bottom sediments of the Onega Periglacial Lake. *Doklady Earth Sciences*, 407(1): 213–216]

Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям (2022) Субетто Д. А., Белкина Н. А., Страховенко В. Д. и др. (коллективная монография); Субетто Д. А. (ответственный редактор); Министерство науки и высшего образования РФ, Министерство просвещения РФ, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Российский научный фонд. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 331 с. [*Paleolimnology of Lake Onego: from the Onego Ice Lake to the present state* (2022) Subetto D. A., Belkina N. A., Strakhovenko V. D. and others (collective monographic scientific work); Subetto D. A. (Responsible editor); Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ministry of Education of the Russian Federation, Federal Research Centre "Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences", Russian Science Foundation. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 331 p. (in Russian)]

Страховенко В. Д., Субетто Д. А., Малов В. И., Кириченко И. С., Белкина Н. А., Потехин М. С., Орлов А. В. (2025a) Особенности минеральных парагенетических ассоциаций и геохимический состав различных пачек ленточных глин Онежского приледникового озера. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 70(1): 166–188 [Strakhovenko V. D., Subetto D. A., Malov V. I., Kirichenko I. S., Belkina N. A., Potakhin M. S., Orlov A. V. (2025a) Features of mineral paragenetic associations and geochemical composition of various bundles of varve clays of Onego Ice Lake. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* [Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle], 70(1): 166–188 (in Russian)]

Страховенко В. Д., Субетто Д. А., Рыбалко А. Е., Малов В. И., Белкина Н. А., Потехин М. С., Орлов А. В. (2025b) Минералого-геохимические особенности донных отложений Онежского озера последнего ледникового – озерно-ледникового – озерного седиментационного цикла (верхний неоплейстоцен-голоцен). *Геоморфология и палеогеография*, 56(4) (в печати) [Strakhovenko V. D., Subetto D. A., Rybalko A. E., Malov V. I., Belkina N. A., Potakhin M. S., Orlov A. V. (2025b) Mineralogical and geochemical features of Lake Onega' bottom sediments of the last glacial – limnoglacial – lacustrine sedimentation cycle (late Pleistocene-Holocene). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*, 56(4) (in press) (in Russian)]

Andersen D. T., Sumner D. Y., Hawes I., Webster-Brown J., McKay C. P. (2011) Discovery of large conical stromatolites in Lake Untersee, Antarctica. *Geobiology*, 9(3): 280–293

Andronikov A. V., Andronikova I. E., Subetto D. A., Rudnickaitė E. (2018) Geochemical records of paleocontamination in Late Pleistocene lake sediments in West Flanders (Belgium). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 100(2): 204–220

Bunch T. E., Hermes R. E., Moore A. M. T., Kennett D. J., Weaver J. C., Wittke J. H., DeCarli P. S., Bischoff J. L., Hillman G. C., Howard G. A., Kimbel D. R., Kletetschka G., Lipo C. P., Sakai S., Revay Z., West A., Firestone R. B., Kennett J. P. (2012) Very high-temperature impact melt products as evidence for cosmic airbursts and impacts 12,900 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(28): E 1903–E 1912

Chazhengina S. Y., Kovalevski V. V. (2017) Raman spectroscopy of weathered shungites. *Journal of Raman Spectroscopy*, 48(11): 1590–1596

Firestone R. B., West A., Kennett J. P., Becker L., Bunch T. E., Revay Z. S., Schultz P. H., Belgia T., Kennett D. J., Erlandson J. M., Dickenson O. J., Goodyear A. C., Harris R. S., Howard G. A., Kloosterman J. B., Lechler P., Mayewski P. A., Montgomery J., Poreda R., Darrah T., Que Hee S. S.,

- Smith A. R., Stich A., Topping W., Wittke J. H., Wolbach W. S. (2007) Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(41): 16016–16021
- Greco C., Andersen D. T., Hawes I., Bowles A. M. C., Yallop M. L., Barker G., Jungblut A. D. (2020) Microbial diversity of pinnacle and conical microbial mats in the perennially ice-covered lake Untersee, East Antarctica. *Frontiers in Microbiology*, 11: 607251
- Hanesch M. (2009) Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy) hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies. *Geophysical Journal International*, 177(3): 941–948
- Hang T., Gurbich V., Subetto D., Strakhovenko V., Potakhin M., Belkina N., Zobkov M. (2019) A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia. *Quaternary International*, 524: 13–23
- Kinzie C. R., Que Hee S. S., Stich A., Tague K. A., Mercer C., Razink J. J., Kennett D. J., DeCarli P. S., Bunch T. E., Wittke J. H., Israde-Alcántara I., Bischoff J. L., Goodyear A. C., Tankersley K. B., Kimbel D. R., Culleton B. J., Erlandson J. M., Stafford T. W., Kloosterman J. B., Moore A. M. T., Firestone R. B., Aura Tortosa J. E., Jordá Pardo J. F., West A., Kennett J. P., Wolbach W. S. (2014) Nanodiamond-rich layer across three continents consistent with major cosmic impact at 12,800 cal BP. *Journal of Geology*, 122(5): 475–506
- Mahaney W. C., West A., Milan A., Krinsley D. H., Somelar P., Schwartz S., Milner M. W., Allen C. C. R. (2018) Cosmic airburst on developing Allerød substrates (soils) in the Western Alps, Mt. Viso Area. *Studia Quaternaria*, 35(1): 3–23
- Moore A. M. T., Kennett J. P., Napier W. M., Bunch T. E., Weaver J. C., LeCompte M., Adediji A. V., Hackley P., Kletetschka G., Hermes R. E., Wittke J. H., Razink J. J., Gaultois M. W., West A. (2020) Evidence of cosmic impact at Abu Hureyra, Syria at the younger Dryas Onset (~ 12.8 ka): High-temperature melting at > 2200 C. *Scientific Reports*, 10(1): 4185
- Pino M., Abarzúa A. M., Astorga G., Martel-Cea A., Cossio-Montecinos N., Navarro R. X., Lira M. P., Labarca R., LeCompte M. A., Adediji V., Moore C. R., Bunch T. E., Mooney C., Wolbach W. S., West A., Kennett J. P. (2019) Sedimentary record from Patagonia, southern Chile supports cosmic-impact triggering of biomass burning, climate change, and megafaunal extinctions at 12.8 ka. *Scientific Reports*, 9(1): 4413
- Powell J. L. (2022) Premature rejection in science: The case of the Younger Dryas Impact Hypothesis. *Science Progress*, 105(1): 1–43
- Wittke J. H., Weaver J. C., Bunch T. E., Kennett J. P., Kennett D. J., Moore A. M. T., Hillman G. C., Tankersley K. B., Goodyear A. C., Moore C. R., Daniel I. R. Jr., Ray J. H., Lopinot N. H., Ferraro D., Israde-Alcántara I., Bischoff J. L., DeCarli P. S., Hermes R. E., Kloosterman J. B., Revay Z., Howard G. A., Kimbel D. R., Kletetschka G., Nabelek L., Lipo C. P., Sakai S., West A., Firestone R. B. (2013) Evidence for deposition of 10 million tonnes of impact spherules across four continents 12,800 y ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(23): E 2088–E 2097
- Zemskaya T. I., Bukin S. V., Lomakina A. V., Pavlova O. N. (2021) Microorganisms in the sediments of Lake Baikal, the deepest and oldest lake in the world. *Microbiology*, 90(3): 298–313

EDN: PLSDZK

УДК 552.143:550.4:504.5(268.4)

Sulfur and Chlorine Compounds in Water and Bottom Sediments of Meromictic Lakes of the White Sea and Barents Sea Basins

Elena S. Kolpakova*,
Galina N. Losyuk, Natalia M. Kokryatskaya,
Anna V. Velyamidova and Elena A. Vakhrameeva
N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research UrB RAS
Arkhangelsk, Russian Federation

Received 26.03.2025, received in revised form 13.08.2025, accepted 09.09.2025

Abstract. The present paper reports data on the contents and distribution of reduced sulfur compounds and organochlorine compounds in the bottom sediments of three meromictic lakes in the European Far North of Russia. The study environments are lakes in the basins of two Arctic seas (the White Sea and the Barents Sea). Lake Trekhtzvetnoe is located in the area that is directly unaffected by human activities, Lake Bol'shie Khruslomeny is not directly affected by point source pollution, and Lake Mogilnoe is subjected to pollution from local sources. The obtained results indicate fairly high rates of bacterial reduction of sulfates and anaerobic destruction of organic matter in the bottom sediments studied. The current study shows that the considerable accumulation of reduced sulfur compounds in lake sediments is associated with the input of autochthonous organic matter available for microorganisms. The data on the composition and quantity of organochlorine compounds suggest that their presence in lake sediments is the result of the additive effect of anthropogenic factors and natural processes. The most likely origin of persistent organic pollutants in the sediments of Lakes Bol'shie Khruslomeny and Trekhtzvetnoe is regional, interregional, and transboundary transport from various sources. The presence of persistent organic pollutants in the sediments of Lake Mogilnoe may be associated with both long-range transport and input from various local anthropogenic sources in the lake catchment area. The present study demonstrates that the composition of chlorophenolic compounds in the bottom sediments of the study lakes that are not directly affected by human activities is mainly determined by natural sources. The specific conditions that have developed in the ecosystems of the meromictic lakes suggest insufficient

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: kolpelen@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8291-7191 (Kolpakova E.); 0000-0001-6636-2344 (Losyuk G.); 0000-0002-0619-7241 (Kokryatskaya N.); 0000-0001-6183-3397 (Velyamidova A.); 0000-0001-5129-2419 (Vakhrameeva E.)

efficiency of the processes of biodegradation of chlorophenolic compounds in water and bottom sediments, contributing to their accumulation.

Keywords: meromictic lakes, bottom sediments, reduced sulfur, persistent organic pollutants, chlorophenolic compounds, gas chromatography.

Citation: Kolpakova E. S., Losyuk G. N., Kokryatskaya N. M., Velyamidova A. V., Vakhrameeva E. A. Sulfur and chlorine compounds in water and bottom sediments of meromictic lakes of the White Sea and Barents Sea basins. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 285–302. EDN: PLSZDK



Соединения серы и хлора в воде и донных осадках меромиктических озёр бассейнов Белого и Баренцева морей

Е. С. Колпакова, Г. Н. Лосюк,
Н. М. Кокрятская, А. В. Вельямидова, Е. А. Вахрамеева
*Федеральный исследовательский центр
комплексного изучения Арктики
им. академика Н. П. Лаверова УрО РАН
Российская Федерация, Архангельск*

Аннотация. В статье представлены данные о содержании и распределении соединений восстановленной серы и хлорорганических соединений в донных осадках трёх меромиктических озёр, расположенных на территории Европейского Крайнего Севера РФ. Объектами исследования выбраны озера, относящиеся к бассейнам двух арктических морей (Белого и Баренцева). Озеро Могильное находится под влиянием локальных источников загрязнения, озеро Большие Хрусломены не подвержено прямому влиянию точечных источников загрязнения, озеро Трёхцветное удалено от прямого антропогенного воздействия. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой интенсивности бактериальной редукции сульфатов и процессов анаэробной деструкции органического вещества в исследованных осадках. Показано, что высокий уровень накопления соединений восстановленной серы в озерных осадках обеспечивается поступлением доступного для микроорганизмов автохтонного органического вещества. На основании данных о составе и количестве хлорорганических соединений показано, что их присутствие в озерных осадках обусловлено аддитивным влиянием антропогенных факторов и естественных процессов. Поступление стойких органических загрязнителей в донные осадки озёр Большие Хрусломены и Трёхцветное, вероятнее всего, обусловлено региональным, межрегиональным и трансграничным переносом от различных источников. Присутствие стойких органических загрязнителей в донных осадках оз. Могильное может быть связано как с трансграничным переносом, так и с поступлением с водосборной площади озера. Установлено, что компонентный состав хлорфенольных соединений в донных осадках озёр Большие Хрусломены и Трёхцветное обусловлен преимущественно природными источниками

их образования. Показано, что сложившиеся в экосистеме исследованных меромиктических озер специфические условия предполагают недостаточную эффективность процессов биodeградации хлорфенольных соединений в воде и донных осадках, способствуя их накоплению.

Ключевые слова: меромиктические озера, донные осадки, восстановленная сера, стойкие органические загрязнители, хлорфенольные соединения, газовая хроматография.

Цитирование: Колпакова Е. С. Соединения серы и хлора в воде и донных осадках меромиктических озер бассейнов Белого и Баренцева морей / Е. С. Колпакова, Г. Н. Лосюк, Н. М. Кокрятская, А. В. Вельямидова, Е. А. Вахрамеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 285–302. EDN: PLSDZK

Введение

Считается, что экосистемы северных территорий отличаются слабой устойчивостью к разным воздействиям (антропогенному влиянию, климатическим изменениям) и крайне медленной скоростью восстановления (Бедрицкий, 2018). Как известно, акватория и береговая зона морей Европейского Севера РФ (Белого и Баренцева) подвержены влиянию разнообразных антропогенных источников не только регионального, но и глобального масштаба. Одним из важных показателей состояния природных экосистем является присутствие хлорорганических соединений (ХОС). Среди всего многообразия хлорорганических соединений выделяется группа так называемых стойких органических загрязнителей (СОЗ) – соединений с высокой биологической активностью и многоплановым долгосрочным токсичным воздействием, обладающих устойчивостью к разложению и способностью к биоаккумуляции (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs): www.pops.int). При этом СОЗ представляют опасность для здоровья человека и других живых организмов не только в местах своего использования и/или образования и поступления в окружающую среду. Эти соединения разной степени летучести и липофильности способны к локальному, региональному и трансграничному переносу различными путями (с атмосферными потоками, морскими течениями,

мигрирующими видами живых организмов), вследствие чего перемещаются в высокоширотные арктические и субарктические районы, значительно удаленные от первоначальных источников (Wania, Mackay, 1995; AMAP, 2015, 2018). Здесь, в условиях холодного климата, происходит накопление/консервация СОЗ в компонентах наземных и водных экосистем (почвах, донных отложениях, снежном покрове, толще льда) и биоусиление их воздействия.

Если ранее происхождение и накопление хлорорганических соединений связывали главным образом с антропогенными факторами, то к настоящему времени накоплено достаточно доказательств того, что образование ХОС происходит еще и вследствие естественных процессов – хлорирования органического вещества при взаимодействии с хлорид-ионами и ферментативного продуцирования (Gribble, 2023). Представительной группой таких ХОС являются ионогенные хлорфенольные соединения (ХФС), которые различаются между собой по гидрофобности, липофильности, токсичности, сорбционной способности на органическом веществе, а также биодоступностью и подвижностью в природных средах (Lyytikäinen et al., 2001; Gaitan et al., 2011). Группа этих соединений включает хлорированные фенолы и их производные (метокси- и гидроксихлорфенолы), образующиеся в окружающей среде в резуль-

тате биохимических, в том числе ферментативных процессов, а также поступающие от различных источников техногенного происхождения (Field, 2016; Gribble, 2023). Среди ХФС к наиболее значимым с точки зрения экологической опасности для окружающей среды относятся высокозамещенные хлорированные фенолы (в первую очередь пентахлорфенол), хлоргваяколы (метоксихлорфенолы) и хлоркатехолы (гидроксихлорфенолы) (Suntio et al., 1988; Luutikainen et al., 2001). Одним из крупных биогенных источников ХФС являются морские экосистемы, где основная роль в их образовании принадлежит бурым и диатомовым водорослям; в пресноводных водоемах активными продуцентами также выступают диатомовые и сине-зеленые водоросли (Gribble, 2023). Кроме того, образованию ХФС способствуют процессы дехлорирования высокохлорированных фенолов, протекающие в компонентах окружающей среды под действием анаэробных и аэробных микроорганизмов. При этом продуктами восстановительного дехлорирования являются хлорированные фенолы, а окислительного дехлорирования – метокси- и гидроксихлорфенолы (Field, Sierra-Alvarez, 2008).

В то же время реальное влияние процессов, связанных с изменением климата, показывает высокую сложность этих взаимодействий, особенно во взаимосвязи с многофакторной антропогенной нагрузкой. Многогранность возможных реакций на происходящие процессы со стороны природных экосистем при возможности их задержки и перекрывания, проявления синергетических, аддитивных и антагонистических механизмов делает крайне сложными попытки предсказания возможных последствий (Титова и др., 2023).

Все вышесказанное особенно актуально для исследования водных экосистем со стра-

тифицированной водной толщей, особенно для меромиктических водоемов с анаэробным монимолимнионом. В анаэробных условиях активизируется деятельность сульфатредуцирующих бактерий, что приводит к появлению и накоплению сероводорода, соединения крайне опасного для аэробных гидробионтов. С другой стороны, сероводород играет роль основного регулятора окислительно-восстановительных условий и влияет на общую направленность и эффективность протекающих в водоеме процессов. Полученные количественные параметры процесса сульфатредукции позволят выявить его роль в анаэробной минерализации органического вещества, а их сочетание с данными о количественном содержании, распределении и компонентном составе хлорорганических соединений позволит оценить влияние этих процессов на экологическое состояние водных экосистем в специфических условиях северных территорий.

Меромиктические водоемы представляют собой объекты с уникальной гидрологической и гидрохимической структурой. Водная тоща таких озер представляет собой многослойную структуру, состоящую из перемешивающегося аэробного миксолимниона, далее идет хемо-, гало- и термоклин и ниже располагается анаэробный слой, в котором за счет интенсивно протекающего процесса бактериального восстановления сульфатов образуется сероводород, иногда в очень больших количествах. Протекает этот процесс и в донных осадках (ДО), где появление сероводорода сопровождается образованием разнообразных органических и неорганических соединений восстановленной серы, общее содержание которых характеризуют параметром «сумма производных бактериального сероводорода (ΣS_{H_2S})». В ее состав входит сера

кислоторастворимых сульфидов, пиритная, элементная и органическая (Волков, 1984).

Целью данного исследования являлось изучение поведения ХОС, а также сравнение содержания соединений восстановленной серы как геохимического параметра процесса сульфатредукции в донных осадках трех меромиктических озер, расположенных на территории Европейского Крайнего Севера РФ, относящихся к бассейнам двух арктических морей: Белого и Баренцева.

Материалы и методы

Все три озера, выбранные для исследования, относятся к экзогенным меромикти-

ческим морского типа с эвксинной аноксией (Краснова, 2021). Они образовались в результате отделения заливов от моря, при этом озера Трехцветное и Могильное в результате естественных процессов – изостатического поднятия берега и тектоники, в то время как оз. Большие Хрусломены было сформировано искусственно.

Карта-схема расположения исследуемых озер приведена на рис. 1, их краткая характеристика в табл. 1.

Озеро Большие Хрусломены расположено на о. Олений в Кандалакшском заливе Белого моря (рис. 1). Озеро отделено от моря валунной перемычкой, через которую во вре-



Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных озер и станций отбора проб

Fig. 1. Diagrammatic map of the locations of the study lakes and sampling positions

Таблица 1. Морфометрические характеристики исследуемых озер

Table 1. Morphometric characteristics of the study lakes

Параметр	Оз. Большие Хрусломены N 66° 42.97' E 32° 51.54'	Оз. Трехцветное N 66° 35.53' E 32° 58.85'	Оз. Могильное N 69° 19.09' E 34° 21.01'
Площадь водоема, км ²	0,75	0,032	0,096
Длина, м	1000	340	560
Ширина, м	280	135	275
Максимальная глубина, м	18,5	7,5	16,5
Средняя глубина, м	2,0	2,5	7,0

мя прилива в него непродолжительное время поступает морская вода, но большую часть времени течение направлено из озера в море, и по ручью стекает солоноватая вода. В 1895 году при строительстве на острове лесопильного завода заливы Большие и Малые Хрусломены каменными преградами были отделены от моря с образованием одноименных озер. Лесозавод располагался на противоположной от озер части жилого поселка (примерно в 5 км от исследованных озер) и функционировал до 1995 года; при этом транспортировка леса и пиломатериалов осуществлялась через Горелую губу (с выходом в Белое море). С учетом вышесказанного влияние лесозавода как потенциального локального источника загрязнения собственно оз. Большие Хрусломены минимизировано. Озеро Малые Хрусломены (ныне пресное оз. Банное) использовалось только как хранилище и источник пресной воды для оборудования лесозавода, в то время как оз. Большие Хрусломены никогда не использовалось ни с этой целью, ни с какими-либо другими хозяйственными целями, поскольку практически сразу после отделения от моря в озере стала развиваться меромиктическая структура (из-за большой глубины озера и постоянной связи с морем через небольшой ручей). Свой вклад в загрязнение этого озера (равно как и других

исследованных озер) вносят региональный, межрегиональный и трансграничный переносы от разнообразных источников.

В настоящее время поверхностный слой воды в оз. Большие Хрусломены до глубины 2 м опреснен до 3–7 епс, под ним находится пикно-, гало- и хемоклин, основная толща с глубины 4 м соленая, самый нижний слой монимолимниона имеет морскую солёность (Краснова и др., 2016) и очень высокое содержание сероводорода (~500–600 мг/л) и метана (~30 мг/л) (Лосюк и др., 2019; Savvichev et al., 2020). Развитие в зоне хемоклина зеленых серных бактерий (Savvichev et al., 2020; Лунина и др., 2023), способных к аноксигенному фотосинтезу, предохраняет вышерасположенные воды от сероводородного заражения.

Озеро Трехцветное, самое мелководное из трех (табл. 1), расположено в Ругозерской губе Кандалакшского залива Белого моря в окрестностях Беломорской биологической станции МГУ им. М.В. Ломоносова (рис. 1) и удалено от прямого антропогенного воздействия. Несмотря на небольшую глубину озера, для него характерна полностью развитая стратификация водной толщи. Пресный верхний слой (миксолимнион) располагается до глубины 1 м, под ним узкий галоклин и практически совпадающий с ним хемоклин с резкими физико-химическими градиента-

ми и высокой плотностью микробного сообщества с доминированием зеленых серных бактерий (Savvichev et al., 2018; Лунина и др., 2019), маркируемый слоем воды ярко-зеленого цвета. Ниже расположен мониомлимон со стабильными значениями температуры и солености, а также постоянным присутствием сероводорода, концентрация которого в придонных горизонтах озера достигает огромных значений – до 600 мг/л (Лосюк и др., 2021).

Озеро Могильное – реликтовый меромиктический водоем, расположенный на заполярном острове Кильдин в Баренцевом море. Оно является остатком морского залива, отделившегося от моря около полутора тысяч лет назад каменной перемычкой, но до сих пор сохраняет подземную связь с морем. На сегодняшний день это единственное известное анхалиновое озеро в Арктическом регионе России (Краснова, 2021). В вертикальной структуре вод оз. Могильное выделяется несколько слоев, соответствующих структуре меромиктического водоема (Реликтовое озеро..., 1975, 2002; Strelkov et al., 2019): 1) пресный/солончатый (5–10 епс) миксолимнион до глубины 2–2,5 м; 2) аэробный слой морской воды, который сообщается с морем через фильтрующую каменистую дамбу. Одним из уникальных обитателей морского слоя является эндемик этого озера – кильдинская треска; 3) еще ниже находится мониомлимон с сероводородом, концентрация которого превышает 200 мг/л (Кокрятская и др., 2025). На границе кислородной и сульфидной зон (глубина около 8 м) есть прослойка воды розового цвета, который обусловлен присутствием анаэробных фототрофных бактерий (Реликтовое озеро..., 2002; Горленко и др., 2024). Следует отметить, что в настоящее время вокруг оз. Могильное не ведется никакая-либо деятельность,

однако его водосборная территория является локальным источником загрязнителей, в том числе хлорорганических. На о. Кильдин до настоящего времени сохраняются остатки военной техники, скопления бытового и строительного мусора, поскольку с 30-х годов XX века остров имел статус территории военно-стратегического назначения.

Пробы донных осадков (ДО) были отобраны в наиболее глубокой части акватории исследуемых озер в ходе экспедиционных работ 2019 г. (координаты точек отбора в табл. 1). Отбор производили ударной прямой грунтовой трубкой Aquatic Research Instruments (США) с внутренним диаметром 50 мм, длиной 60 см, дискретность отбора проб 5 см. Пробы ДО сразу после отбора помещали в полиэтиленовые пакеты, из которых отжимали воздух для предотвращения окисления осадков.

Извлечение ХОС из воздушно-сухих проб ДО проводили методом ускоренной жидкостной проточной экстракции горячей смесью гексан/ацетон (в соотношении 3:1) при температурах ниже точки кипения (Kokryatskaya et al., 2023). Полученный экстракт обрабатывали 0,2 н раствором гидроксида натрия (NaOH) для разделения кислых (ХФС) и нейтральных соединений. Выделенную органическую фазу, содержащую соединения нейтрального характера (гексахлорбензол (ГХБ), пентахлорбензол (ПХБ), пентахлорфенол (ПХФ), пентахлоранизол (ПХА)), очищали от сопутствующих органических примесей многократной обработкой концентрированной серной кислотой, как описано в РД 52.24.417–2011, с последующей идентификацией и количественным определением методом газовой хроматографии (ГХ Кристалл 5000.1, Россия). Определение концентраций ХФС в легко- и трудноэкстрагируемых фракциях проводили в соответ-

ствии со стандартом ISO 14154:2005 методом газовой хроматографии. Все концентрации даны в расчете на воздушно-сухую пробу.

Определение массовой доли общего углерода ($C_{\text{общ}}$), а также органических углерода ($C_{\text{орг}}$) и азота ($N_{\text{орг}}$) проводили с использованием анализатора элементного состава (однореакторный вариант, конфигурационный набор CHN) EuroEA3000 (Eurovector, S.p.A., Италия). Диапазон измерения массовой доли элемента составляет от 0,01 до 100 %. Среднее квадратичное отклонение случайной составляющей погрешности измерений, массовая доля: C – 0,3 %; N – 0,1 %.

Гранулометрический состав ДО определяли пипеточным методом в комбинации с ситовым (для фракции с размером частиц выше 0,1 мм), как описано в ФР.1.31.2018.29623. Расчет содержания фракций проводили на сухую навеску образца. Относительная погрешность измерения для всех гранулометрических фракций – от 19 до 29 мас. %.

Анализ проб ДО на содержание восстановленных форм серы проводили по методике, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П.П. Ширшова

РАН (Волков, Жабина, 1980). Все концентрации даны в расчете на сухой остаток.

Результаты и обсуждение

Отобранные в озерах ДО представлены обводненными илами темно-коричневого цвета: с влажностью 95,2–62,9 % в оз. Большие Хрусломены, 93,6–33,2 % в оз. Могильное и 95,6–74,4 % в оз. Трехцветное. По результатам гранулометрического анализа (рис. 2) исследуемые осадки можно характеризовать как алевро-пелитовые (оз. Могильное) и пелито-алевритовые (оз. Трехцветное и Большие Хрусломены) илы. В поверхностных слоях осадков всех трех озер преобладает наиболее тонкая фракция, причем в ДО оз. Трехцветное и Большие Хрусломены она представлена на 70–80 % пелитовой фракцией (в том числе 60–70 % фракции <0,001 мм), а в оз. Могильное – смесью алевритов (38 %) и пелитов (31 %). По мере погружения в толщу осадков во всех случаях наблюдается утяжеление их состава, но если в оз. Могильное количество песчаной фракции постепенно возрастает от 11 % в верхних слоях до 42 % в нижних (песчаный алеврит), то в ДО оз. Большие Хрусломены

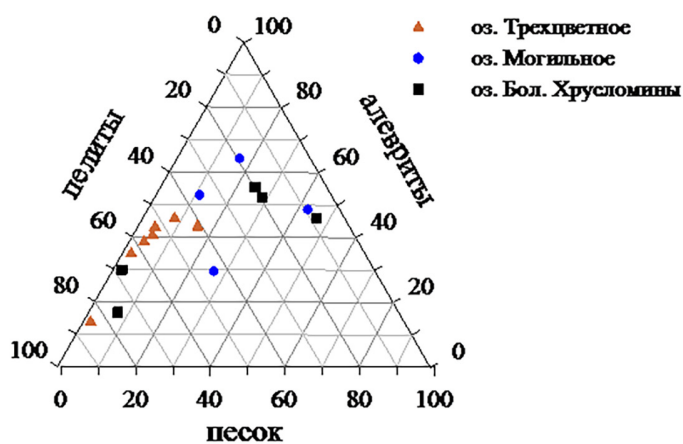


Рис. 2. Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава донных отложений исследуемых озер

Fig. 2. Three-component phase diagram of the grain size distribution in bottom sediments of the study lakes

содержание грубодисперсной фракции резко возрастает ниже горизонта 10–15 см от 1–7 до 24–46 % (песчано-алевритовый ил). В оз. Трехцветное сколько-нибудь значимое влияние песчаной фракции на состав ДО отмечено только для самого нижнего слоя исследованного керна (30–35 см), где ее содержание составляет 15 %, осадок характеризуется как песчано-пелитовый алеврит, а его цвет изменяется с коричневого на серый.

Содержание органического вещества (ОВ), оцениваемое по количеству $C_{орг}$, варьировало от 15,2 до 1,9 % для оз. Большие Хрусломены, от 8,6 до 5,5 % для оз. Трехцветное и от 11,3 до 1,8 % для оз. Могильное. При этом наиболее высокие значения показателя характерны для верхних слоев ДО. Основываясь на величине параметра C/N-отношения, можно говорить о смешанном характере органического вещества и его достаточной однородности в глубоководных осадках исследованных озер. При этом в осадках оз. Могильное в состав ОВ достаточно заметный вклад вносит терригенная составляющая (C/N в среднем 10,7), в то время как в осадках озер Трехцветное и Большие Хрусломены преобладало, скорее всего, автохтонное ОВ (средние значения параметра составляли 6,5 и 5,9 соответственно).

В ДО в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий в бескислородных условиях образуется сероводород, который трансформируется в различные по устойчивости соединения восстановленной серы, а именно: кислоторастворимые моносulfиды серы (S^{2-} , преимущественно гидротроилит), пирит ($S_{пир}$), элементную серу (S^0) и серу, связанную с органическим веществом ($S_{орг}$) (Волков, 1984). Сумма этих четырех основных форм (ΣS_{H_2S}) характеризует общее накопление восстановленной серы в осадках. Содержание ΣS_{H_2S} в ДО оз. Могильное изме-

нялось от 0,33 до 0,76 %, составляя в среднем 0,49 %; в оз. Трехцветное – 0,22 до 1,47 %, в среднем 0,99 %; в оз. Большие Хрусломены – 0,51 до 1,42 %, в среднем 0,74 %. Сравнение этих результатов с данными для поверхностного слоя осадков водоемов с постоянным или периодически возникающим сероводородным заражением придонных вод: Черное море – 0,29–2,46 (Химия морей..., 1995), Балтийское море, Готландская впадина – 0,46–1,68 (Геохимия..., 1986), Азовское море – 0,44–1,05 (Волков, 1984), позволяет сделать вывод об их сопоставимости, а также оценить полученные нами данные по величине ΣS_{H_2S} в ДО как относительно высокие. Максимальное содержание ΣS_{H_2S} приурочено к обогащенным органическим веществом поверхностным горизонтам осадков. Известно, что образование бактериального сероводорода и накопление восстановленной серы в осадках в ходе диагенеза прямо связано с накоплением органического вещества в ходе седиментагенеза (Волков, 1984). Таким образом, высокий уровень ΣS_{H_2S} в ДО изучаемых водоемов может быть следствием обеспеченности микробного сообщества органическим веществом. Однако коэффициент корреляции между ΣS_{H_2S} и $C_{орг}$ невысокий ($r = 0,66$, $n = 16$), хотя и значимый. Скорее всего, это является отражением смешанного характера поступающего в осадки органического вещества: судя по величине C/N-отношения, оно (особенно в верхних слоях ДО) значительно разбавлено терригенной органикой, поступающей с водосбора. Несмотря на высокую продуктивность микроорганизмов в хемоклине, характерную для всех трех меромиктических озер (Savvichev et al., 2018, 2020; Горленко и др., 2024), образующееся здесь лабильное ОВ, скорее всего, в значительной мере расходуется в анаэробных процессах минималистического цикла. По мере продвижения к нижним сло-

ям отобранных кернов количество ΣS_{H_2S} или уменьшалось (оз. Могильное), или оставалось практически неизменным в осадках (оз. Трехцветное и Большие Хрусломены) (рис. 3).

В осадках всех трех озер в пределах всей исследованной мощности ДО преобладающей формой была пиритная (рис. 3), составляющая в среднем 70 % от ΣS_{H_2S} . Ее количество практически полностью определяло изменение и накопление ΣS_{H_2S} в ДО ($r = 0,95$, $n = 16$), что косвенно свидетельствует об активном протекании в отложениях данных озер процесса бактериальной сульфатредукции. Второй по значимости вклада в суммарное содержание форм восстановленной серы является органическая – в среднем 19 % от ΣS_{H_2S} . Наиболее высокие количества органической серы отмечены в осадках поверхностных горизонтов оз. Трехцветное (58 % от ΣS_{H_2S}) и оз. Большие Хрусломены (38 % от ΣS_{H_2S}), затем уменьшалось как ее количество, так и доля в ΣS_{H_2S} – в среднем до 7–8 %. Количество промежуточных форм (сульфидной и элементной серы) в суммарном содержании восстановленной серы невелико (в среднем по колонке) – оз. Могильное – 0,005 и 0,009 %; оз. Трехцветное – 0,026 и 0,146 %; оз. Большие Хрусломены – 0,011 и 0,054 % соответственно. Особенно это справедливо для кислоторастворимой сульфидной серы, ее вклад в ΣS_{H_2S} для всех исследованных кернов не превышал 1,1; 3,6 и 1,7 % от ΣS_{H_2S} для ДО оз. Могильное, Трехцветное и Большие Хрусломены соответственно. Более заметна роль элементной серы, которая может образовываться в ДО только в результате окисления сероводорода или сульфидов микробным или химическим путем, – в среднем 8 % от ΣS_{H_2S} . В водоемах с аэробными наддонными водами она образуется в результате окисления сероводорода/сульфидов кислородом, проникающим в ДО из наддонной воды. Тогда как для меромик-

тических озер с эвксинной аноксией, где над ДО расположен мощный слой воды с высоким содержанием сероводорода, ее образование, скорее всего, связано с взаимодействием сероводорода не с кислородом, а с трехвалентным железом, которое поступает в осадки из аэробных вод миксолимниона (подробно этот процесс был рассмотрен для оз. Трехцветное (Лосюк и др., 2023)).

Стойкие хлорорганические загрязнители (ГХБ, ПеХБ, ПХФ, ПХА) в донных осадках исследованных озер были обнаружены практически повсеместно в количествах от 21,2 до 269,3 нг/г (табл. 2). При этом в порядке убывания концентраций СОЗ располагались следующим образом: ГХБ > ПХФ > ПеХБ > ПХА.

В осадках озера Большие Хрусломены суммарное содержание СОЗ было наименьшим; среди полихлорированных бензолов преобладал ГХБ (9,1–17,2 нг/г), количества ПеХБ не превышали 1,4 нг/г. Такими же незначительными были концентрации ПХА (не более 0,2 нг/г). Количества ПХФ в осадках определены практически на том же уровне, что и ГХБ – от 8,5 до 12,7 нг/г.

В осадках озера Трехцветное суммарные концентрации СОЗ варьировали от 22,9 до 63,6 нг/г. Уровни содержания ГХБ (6,5–40,4 нг/г) оказались соизмеримы с таковыми ПХФ (15,8–37,3 нг/г), тогда как ПеХБ и ПХА были найдены в менее значимых количествах (не более 2,5 и 0,2 нг/г соответственно).

В донных осадках озера Могильное концентрации стойких хлорорганических загрязнителей оказались самыми высокими. Доминировали по-прежнему ГХБ и ПХФ. Концентрации ГХБ (от 39,4 до 191,8 нг/г) были на 1–2 порядка выше по сравнению с количествами ПеХБ (от 2,2 до 16,0 нг/г), практически на том же уровне в осадках определен ПХФ (от 7,2 до 89,7 нг/г).

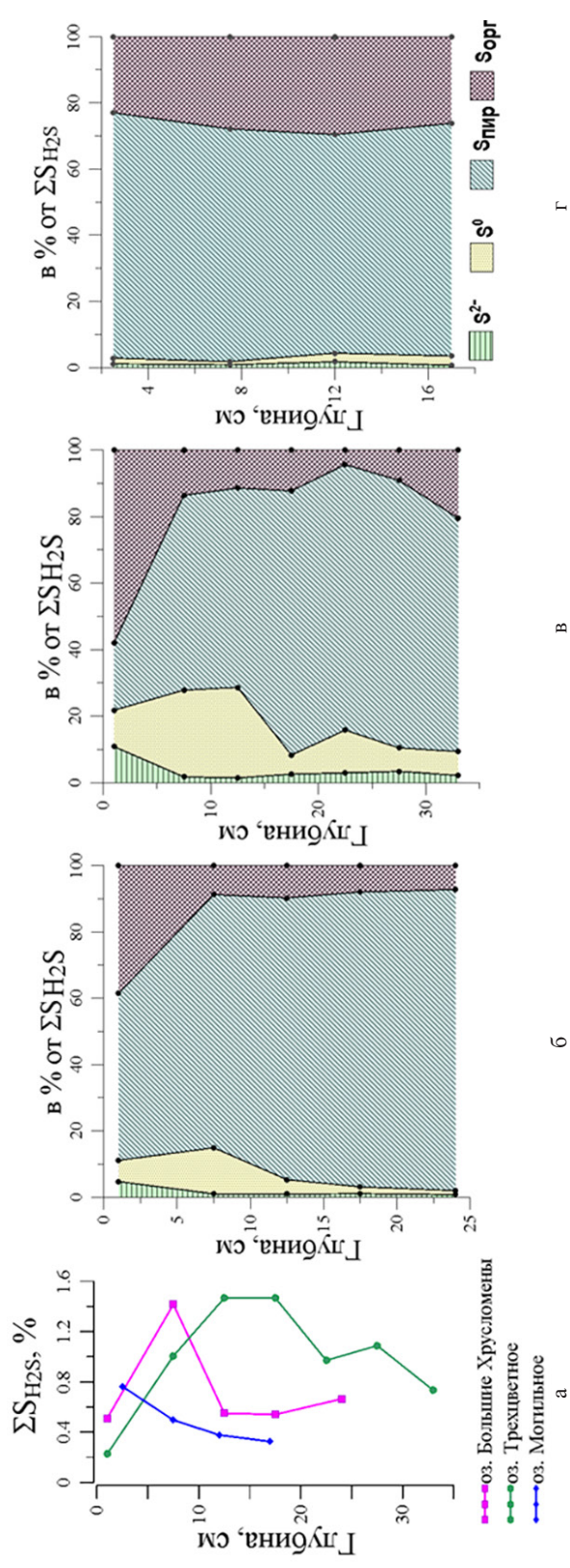


Рис. 3. Содержание ΣSH_{2S} (а) и соотношение форм в ее составе в озерах Большие Хрусломены (б), Трехцветное (в) и Могильное (г)

Fig. 3. The content of ΣSH_{2S} (a) and the percentages of its forms in Lake Bol'shie Khruslomeny (б), Lake Trekhizvetnoe (в) and Lake Mogilnoe (г)

Таблица 2. Содержание ХОС в ДО исследованных озер

Table 2. Content of organochlorine compounds in bottom sediments of the study lakes

	Место отбора		
	оз. Большие Хрусломены	оз. Трехцветное	оз. Могильное
Стойкие органические загрязнители, нг/г	21,2–27,6	22,9–63,6	48,8–269,3
Хлорфенольные соединения, мкг/г	0,80–1,94	2,04–2,15	1,24–3,25

Следует отметить, что в соответствии с классификацией по норвежским стандартам качества донных осадков (Grenseverdier for klassifisering..., 2016) найденные концентрации индивидуальных СОЗ в осадках озер Большие Хрусломены и Трехцветное в большинстве своем имели низкие значения. В случае озера Могильное установленные концентрации стойких хлорорганических загрязнителей можно классифицировать следующим образом: от низких до высоких (для полихлорбензолов) и очень высоких (в случае ПХФ) (Kolpakova et al., 2024).

Поступление СОЗ в донные осадки оз. Трехцветное, вероятнее всего, связано с региональным, межрегиональным и трансграничным переносом от разнообразных источников (включая контролируемые процессы сжигания/горения различного вида органического сырья и отходов, лесные пожары и пр.). В случае оз. Большие Хрусломены свой вклад в загрязнение могут вносить еще и процессы сжигания твёрдых видов топлива, например древесины, которые используются в домашних хозяйствах близлежащего жилого поселка.

Что касается озера Могильное, то присутствие здесь СОЗ можно связывать не только с дальним переносом, но и эмиссией загрязнителей с водосборной площади озера. Следует отметить, что в настоящее время основными глобально действующими источниками указанных хлорорганических загрязнителей считаются процессы сжигания/

горения различного вида органического сырья и отходов (бытовых и промышленных отходов, биомассы, всех видов топлива), а также отходы производства и потребления от прошлой хозяйственной деятельности (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs): www.pops.int). При попадании в водоем загрязнители способны аккумулироваться в гидробионтах и передаваться по пищевой цепи, увеличивая свою концентрацию в каждом последующем звене (проявляется так называемый кумулятивный эффект), а также сорбироваться частицами органического вещества взвеси и донных осадков с последующей «консервацией». При этом специфичность условий (меромиктический режим), складывающихся в исследованных водоемах северных территорий, способствует накоплению и длительному сохранению в осадках СОЗ, поведение которых, как известно, определяется еще и свойствами собственно депонирующей матрицы.

ХФС были определены в осадках всех исследованных озер в диапазоне от 0,80 до 3,25 мкг/г, при этом наибольшее их содержание было найдено в осадках оз. Могильное (табл. 2). В составе ХФС в осадках озер Большие Хрусломены и Трехцветное, преобладали низкохлорированные фенолы (до 75 %). В осадках озера Могильное, напротив, преобладали (до 68 %) высокохлорированные фенолы (рис. 4).

Среди низкохлорированных фенолов в озерах Большие Хрусломены и Трехцвет-

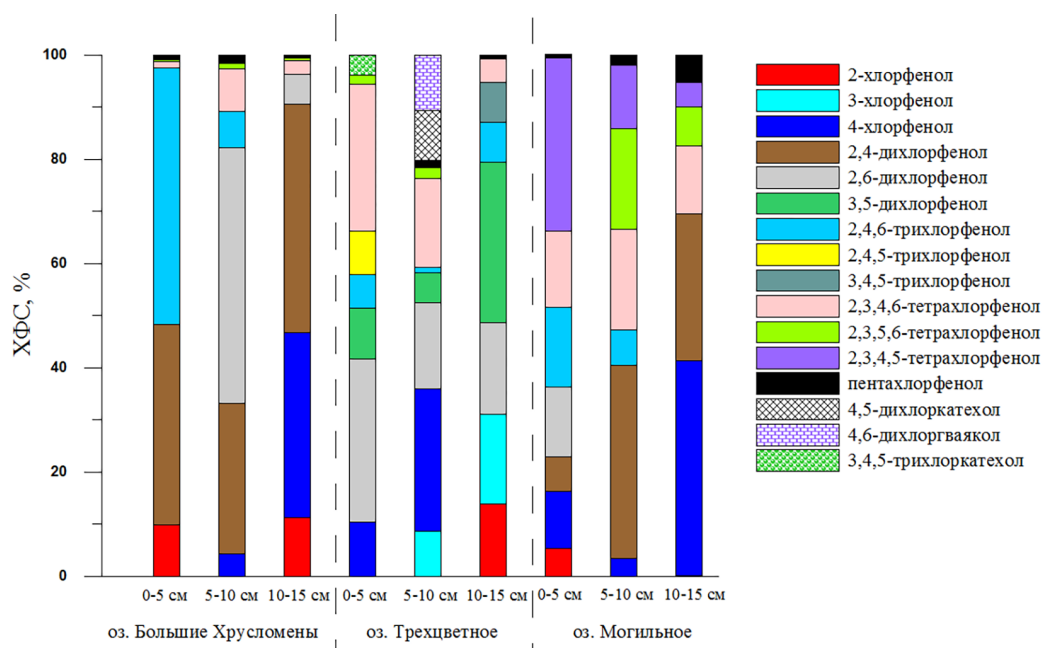


Рис. 4. Компонентный состав ХФС в осадках исследованных озер

Fig. 4. Composition of chlorophenolic compounds (CPs) in bottom sediments of the study lakes

ное в наибольших концентрациях определены 2-, 4-хлорфенолы и 2,4-, 2,6-дихлорфенолы (рис. 4). Данные соединения могут быть природными метаболитами, образующимися в окружающей среде в результате энзиматических процессов (Gribble, 2023). Продуценты ХФС были найдены и в почвах прилегающей территории оз. Трехцветное (Грум-Гржимайло и др., 2020). В то же время в осадках оз. Трехцветное отмечено небольшое (до 10 %) присутствие производных хлорфенолов (4,5-дихлоркатехол, 4,6-дихлоргваякол, 3,4,5-трихлоркатехол), что могло быть связано с их образованием в результате аэробных окислительных процессов, как в водоеме, так и почвах прибрежных территорий (Field, Sierra-Alvarez, 2008).

При рассмотрении компонентного состава ХФС в ДО озера Могильное выделялся профиль соединений (4-хлорфенол, 2,4-дихлорфенол, 2,4,6-трихлорфенол, 2,3,4,6-тетрахлорфенол и ПХФ), источником кото-

рых являются процессы сжигания/горения (Kolpakova et al., 2024). Суммарные концентрации этих соединений составляли от 0,22 до 1,15 мкг/г, при этом на их долю в составе ХФС приходилось более 60 %. Данный факт предполагает преимущественное поступление в озеро хлорфенолов от техногенных источников, а процессы естественного образования имеют невысокий вклад. Действительно, содержание природных хлорфенольных метаболитов (2-хлорфенол и 2,6-дихлорфенол) не превышало 10 % от общего содержания ХФС. В высоких концентрациях в донных осадках оз. Могильное были обнаружены тетрахлорфенолы (2,3,4,6-, 2,3,5,6- и 2,3,4,5-тетрахлорфенолы). Эти соединения по физико-химическим свойствам относятся к токсичным хлорфенолам с высокой липофильностью и имеют антропогенное/техногенное происхождение (Suntio et al., 1988; Lyytikäinen et al., 2001).

В донных осадках в зависимости от pH среды происходит формирование биодоступных и биодоступных составляющих хлорированных фенолов, отличающихся по степени сорбции на твердых частицах матрицы и извлекаемых, соответственно, в легко- и трудноэкстрагируемых фракциях (He et al., 2008).

ХФС во всех исследованных осадках были обнаружены преимущественно в трудноэкстрагируемой фракции (64 %), то есть в труднодоступном для биотрансформации состоянии, что предполагает затруднение протекания миграционных и деструкционных процессов и сохранение ХФ в осадках. Скорее всего, в соленых водах исследованных озер количество микроорганизмов, участвующих в процессах трансформации ХФС, ограничено или они отсутствуют, в связи с чем происходит накопление этих соединений в озерных осадках. Сложившиеся в экосистеме озера специфические условия (наличие соленого слоя и нижнего насыщенного сероводородом слоя) предполагают недостаточную эффективность процессов биodeградации ХФС в воде и донных осадках, способствуя накоплению этих соединений.

Заключение

Проведенные исследования по изучению особенностей процесса сульфатредукции в донных осадках меромиктических озер Трехцветное, Большие Хрусломены и Могильное, а именно геохимических параметров этого процесса – образования и накопления различных форм восстановленной серы, показали высокий уровень накопления соединений восстановленной серы (до 1,47 % в расчете на сух. осадок), что свидетельствует о достаточно высокой интенсивности бактериальной редукции

сульфатов не только в воде этих водоемов, но и в осадках. Подтверждением высокой интенсивности процессов анаэробной деструкции органического вещества является накопление в донных осадках значительных количеств соединений восстановленной серы, преимущественно в составе пирита. Уровень их суммарного содержания сопоставим или всего лишь несколько ниже по сравнению с таковыми в морских акваториях с постоянным присутствием сероводорода (например, в Черном море). Высокий уровень накопления соединений восстановленной серы в ДО исследованных озер обеспечивается, скорее всего, поступлением доступного для микроорганизмов ОВ (имеющим преимущественно автохтонное происхождение), предположительно, за счет интенсивно развивающихся микробных сообществ в зоне хемоклина и в толще озерной воды.

Присутствие ХОС в осадках исследованных озер обусловлено аддитивным влиянием естественных процессов и антропогенных факторов (локальным, региональным и дальним переносом от различных источников, в первую очередь связанных с процессами сжигания/горения). Присутствие СОЗ в донных осадках озера Могильное может быть связано как с трансграничным переносом, так и с поступлением с водосборной площади озера. Состав ХФС в осадках озер, не испытывающих антропогенного влияния, объясняется образованием этих соединений в энзиматических процессах, тогда как в осадки оз. Могильное поступление ХФС происходит от антропогенных источников. При этом накопление ХФС в осадках соленых меромиктических озер предполагает недостаточную эффективность процессов биodeградации в воде и донных осадках.

Список литературы / References

Бедрицкий А. И. (2018) Устойчивое развитие Арктической зоны Российской Федерации и климатические аспекты экологической и гидрометеорологической безопасности. *Энергетическая политика*, 4: 3–10 [Bedritsky A. I. (2018) Sustainable development of the Russian Arctic zone and climatic aspects of environmental and hydrometeorological security. *Energy Policy* [Energeticheskaya politika], 4: 3–10 (in Russian)]

Волков И. И. (1984) *Геохимия серы в осадках океана*. Москва, Наука, 272 с. [Volkov I. I. (1984) *Geochemistry of sulfur in ocean sediments*. Moscow, Nauka, 272 p. (in Russian)]

Волков И. И., Жабина Н. Н. (1980) Методы определения различных соединений серы в морских осадках. *Химический анализ морских осадков*. Остроумов Э. А. (ред.) Москва, Наука, с. 5–27 [Volkov I. I., Zhabina N. N. (1980) Methods for the determination of various sulfur compounds in marine sediments. *Chemical analysis of marine sediments*. Ostroumov E. A. (Ed.) Moscow, Nauka, p. 5–27 (in Russian)]

Геохимия осадочного процесса в Балтийском море (1986) Емельянов Е. М., Лукашин В. Н. (ред.) Москва, Наука, 231 с. [Geochemistry of the sedimentary process in the Baltic Sea (1986) Emel'yanov E. M., Lukashin V. N. (Eds.) Moscow, Nauka, 231 p. (in Russian)]

Горленко В. М., Лунина О. Н., Груздев Д. С., Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Беленкова В. В., Козяева В. В., Саввичев А. С. (2024) Современное представление о биоразнообразии анаэробных фототрофных бактерий в реликтовом озере Могильное (остров Кильдин, Мурманская область). *Микробиология*, 93(3): 267–277 [Gorlenko V. M., Lunina O. N., Grouzdev D. S., Krasnova E. D., Voronov D. A., Belenkova V. V., Kozyaeva V. V., Savvichev A. S. (2024) Present understanding of biodiversity of anoxygenic phototrophic bacteria in the relic Lake Mogilnoe (Kildin Island, Murmansk Oblast, Russia). *Microbiology*, 93(3): 259–268]

Грум-Гржимайло О. А., Биланенко Е. Н., Бубнова Е. Н., Георгиева М. Л. (2020) Актуальные направления в изучении грибов северных торфяных болот в связи с изменением климата и таянием многолетней и вечной мерзлоты. *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований*, 2: 101–114 [Grum-Grzhimaylo O. A., Bilanenko E. N., Bubnova E. N., Georgieva M. L. (2020) Current trends in the exploration of fungi of northern peat bogs in connection with climate change and the thawing of perennial and permafrost. *Russian Foundation for Basic Research Journal* [Vestnik Rossiiskogo fonda fundamental'nykh issledovaniy], 2: 101–114 (in Russian)]

Кокрятская Н. М., Лосюк Г. Н., Колпакова Е. С., Вельямидова А. В., Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Титова К. В., Вахрамеева Е. А., Алиев Р. А. (2025) Современное состояние экосистемы анхиаляинного меромиктического озера Могильное (остров Кильдин, Баренцево море). *Океанология*, 65(2): 264–279 [Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Kolpakova E. S., Velyamidova A. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Titova K. V., Vakhrameeva E. A., Aliev R. A. (2025) Current ecosystem status of the anchialine meromictic Lake Mogilnoe (Kildin Island, Barents Sea). *Oceanology*, 65(2): 236–249]

Краснова Е. Д. (2021) Экология меромиктических озер России. 2. Континентальные водоемы. *Водные ресурсы*, 48(4): 451–460 [Krasnova E. D. (2021) The ecology of meromictic lakes in Russia. 2. Continental water bodies. *Water Resources*, 48(4): 588–597]

Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Демиденко Н. А., Кокрятская Н. М., Пантюлин А. Н., Рогатых Т. А., Самсонов Т. Е., Фролова Н. Л., Шапоренко С. И. (2016) К инвентаризации реликтовых

водоемов, отделяющихся от Белого моря. *Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота – изменения на фоне трансгрессии берегов. Труды Беломорской биостанции МГУ. Том 12.* Мокиевский В. О., Исаченко А. И., Дгебуадзе П. Ю., Цетлин А. Б. (ред.) Москва, Товарищество научных изданий КМК, с. 211–241 [Krasnova E. D., Voronov D. A., Demidenko N. A., Kokryatskaya N. M., Pantyulin A. N., Rogatykh T. A., Samsonov T. E., Frolova N. L., Shaporenko S. I. (2016) For inventory of relict basins separated from the White Sea. *Comprehensive studies of the Babi More, a semi-isolated White Sea lagoon: geology, hydrology, biota – changes against the background of coastal transgression. Proceedings of the White Sea Biological Station of Moscow State University. Volume 12.* Mokievskii V. O., Isachenko A. I., Dgebuadze P. Yu., Tsetlin A. B. (Eds.) Moscow, KMK Scientific Press, p. 211–241 (in Russian)]

Лосюк Г. Н., Краснова Е. Д., Кокрятская Н. М., Воронов Д. А. (2019) Основные гидрологические параметры озера Большие Хрусломены (Кандалакшский залив Белого моря). *География: развитие науки и образования. Том 1. Коллективная монография по материалам ежегодной Всероссийской с международным участием научно-практической конференции LXXII Герценовские чтения, посвященной 150-летию со дня рождения В. Л. Комарова, 135-летию со дня рождения П. В. Гуревича, 90-летию со дня рождения В. С. Жекулина. Санкт-Петербург, РГПУ им. А. И. Герцена, 18–21 апреля 2019 года.* Богданов С. И., Субетто Д. А., Паранина А. Н. (отв. ред.) Санкт-Петербург, РГПУ им. А. И. Герцена, с. 334–336 [Losyuk G. N., Krasnova E. D., Kokryatskaya N. M., Voronov D. A. (2019) Main hydrological parameters of the Bolshye Khruslomeny Lake (Kandalaksha Bay of the White Sea). *Geography: development of science and education. Part I. Collective monograph on materials of the annual All-Russian with the international participation, scientific and practical conference LXXII Gertsenovsky readings, devoted to the 150 anniversary since the birth of V. L. Komarov, to the 135 anniversary since the birth of P. V. Gurevich, to the 90 anniversary since the birth of V. S. Zhekulin. St. Petersburg, A. I. Herzen RSPU, April 18–21, 2019.* Bogdanov S. I., Subetto D. A., Paranina A. N. (Eds.) St. Petersburg, A. I. Herzen RSPU Publishing House, p. 334–336 (in Russian)]

Лосюк Г. Н., Кокрятская Н. М., Краснова Е. Д. (2021) Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря. *Океанология*, 61(3): 401–412 [Losyuk G. N., Kokryatskaya N. M., Krasnova E. D. (2021) Hydrogen sulfide contamination of coastal lakes at different stages of isolation from the White Sea. *Oceanology*, 61(3): 351–361]

Лосюк Г. Н., Кокрятская Н. М., Вахрамеева Е. А., Алиев Р. А. (2023) Соединения восстановленной серы в донных осадках водоемов на разных стадиях отделения от Кандалакшского залива Белого моря (меромиктическое озеро Трехцветное). *Океанология*, 63(5): 784–795 [Losyuk G. N., Kokryatskaya N. M., Vakhrameyeva E. A., Aliev R. A. (2023) Reduced sulfur compounds in bottom sediments of lakes at different stages of separation from Kandalaksha Bay of the White Sea (meromictic lake Trekhztvetnoe). *Oceanology*, 63(5): 683–692]

Лунина О. Н., Саввичев А. С., Бабенко В. В., Болдырева Д. И., Кузнецов Б. Б., Колганова Т. В., Краснова Е. Д., Кокрятская Н. М., Веслополова Е. Ф., Воронов Д. А., Демиденко Н. А., Летарова М. А., Летаров А. В., Горленко В. М. (2019) Сезонные изменения структуры сообщества аноксигенных фототрофных бактерий меромиктического озера Трехцветное (Кандалакшский залив Белого моря). *Микробиология*, 88(1): 100–115 [Lunina O. N., Savvichev A. S., Babenko V. V., Boldyreva D. I., Kuznetsov B. B., Kolganova T. V., Krasnova E. D., Kokryatskaya N. M.,

Veslopolova E. F., Voronov D. A., Demidenko N. A., Letarova M. A., Letarov A. V., Gorlenko V. M. (2019) Seasonal variations in the structure of an anoxygenic phototrophic bacterial community from the meromictic lake Trekhtsvetnoe (Kandalaksha Bay, White Sea). *Microbiology*, 88(1): 100–114]

Лунина О. Н., Груздев Д. С., Пацаева С. В., Жильцова А. А., Сузина Н. Е., Краснова Е. Д., Воронов Д. А., Кокрятская Н. М., Веслополова Е. Ф., Саввичев А. С. (2023) Аноксигенные фототрофные бактерии меромиктического озера Большие Хрусломены (о. Олений, Кандалакшский залив, Мурманская область, Россия). *Микробиология*, 92(6): 564–580 [Lunina O. N., Grouzdev D. S., Patsaeva S. V., Zhil'tsova A. A., Suzina N. E., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Veslopolova E. F., Savvichev A. S. (2023) Anoxygenic Phototrophic Bacteria of the Meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny (Oleniy Island, Kandalaksha Gulf, Murmansk Oblast, Russia). *Microbiology*, 92(6): 792–806]

Реликтовое озеро Могильное (1975) Гуревич В. И., Цееб Р. Я. (ред.) Ленинград, Наука, 298 с. [Relict Lake Mogilnoe (1975) Gurevich V. I., Tzeeb R. Y. (Eds.) Leningrad, Nauka, 298 p. (in Russian)]

Реликтовое озеро Могильное (исследования 1997–2000 гг.) (2002) Мурманск, Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, 164 с. [Relict Lake Mogilnoe (1997–2000 Research) (2002) Murmansk, N. M. Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography, 164 p. (in Russian)]

Титова К. В., Кокрятская Н. М., Попов С. С., Морева О. Ю., Брагин А. В. (2023) Изучение процесса сульфатредукции в воде озер на территории национального парка «Кенозерский». *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*, 6: 53–65 [Titova K., Kokryatskaya N., Popov S., Moreva O., Bragin A. (2023) Studying the process of sulfate reduction in the water of lakes in the Kenozerky National Park. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences* [Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk], 6: 53–65 (in Russian)]

Химия морей и океанов (1995) Бордовский О. К., Розанов А. Г. (ред.) Москва, Наука, 415 с. [Chemistry of seas and oceans (1995) Bordovsky O. K., Rozanov A. G. (Eds.) Moscow, Nauka, 415 p. (in Russian)]

AMAP (2015) *AMAP assessment 2015: Temporal trends in persistent organic pollutants in the Arctic*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 81 p.

AMAP (2018) *AMAP assessment 2018: Biological effects of contaminants on Arctic wildlife and fish*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway, 96 p.

Field J. A. (2016) Natural production of organohalide compounds in the environment. *Organohalide-respiring bacteria*. Adrian L., Löffler F. (Eds.) Berlin, Heidelberg, Springer, p. 7–29

Field J. A., Sierra-Alvarez R. (2008) Microbial degradation of chlorinated phenols. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(3): 211–241

Gaitan I. J., Medina S. C., González J. C., Rodríguez A., Espejo A. J., Osma J. F., Sarria V., Alméciga-Díaz C. J., Sánchez O. F. (2011) Evaluation of toxicity and degradation of a chlorophenol mixture by the laccase produced by *Trametes pubescens*. *Bioresource Technology*, 102(3): 3632–3635

Grenseverdiere for klassifisering av vann, sediment og biota – revidert 30.10.2020 – Quality standards for water, sediment and biota – revised 2020.10.30 (2016) *Veileder M-608/2016*. Miljødirektoratet, 13 p.

Gribble G. W. (2023) Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive review. *Naturally occurring organohalogen compounds. Progress in the chemistry of organic natural*

products, Volume 121. Kinghorn A. D., Falk H., Gibbons S., Asakawa Y., Liu J.-K., Dirsch V. M. (Eds.) Springer, p. 1–546

He L., Song J., Peng P. (2008) Characterization of extractable and non-extractable polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and sediments from the Pearl River Delta, China. *Environmental Pollution*, 156(3): 769–774

Kolpakova E. S., Velyamidova A. V., Koroleva T. A. (2024) Organochlorine compounds in the bottom sediments of the meromictic Mogilnoe Lake (Kildin Island, Russia). *Limnology and Freshwater Biology*, 4: 416–420

Kokryatskaya N. M., Kolpakova E. S., Titova K. V., Velyamidova A. V. (2023) Sulfur and chlorine compounds in water bodies of the Pymvashor subarctic hydrothermal system. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10): 27328–27339

Lyytikäinen M., Sormunen A., Peräniemi S., Kukkonen J. V. K. (2001) Environmental fate and bioavailability of wood preservatives in freshwater sediments near an old sawmill site. *Chemosphere*, 44(3): 341–350

Savvichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Beletsky A. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kallistova A. Yu., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A., Sigalevich P. A., Mardanov A. V., Ravin N. V., Pimenov N. V. (2020) Microbial processes and microbial communities in the water column of the polar meromictic lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea coast. *Frontiers in Microbiology*, 11: 1945

Savvichev A. S., Babenko V. V., Lunina O. N., Letarova M. A., Boldyreva D. I., Veslopolova E. F., Demidenko N. A., Kokryatskaya N. M., Krasnova E. D., Gaisin V. A., Kostryukova E. S., Gorlenko V. M., Letarov A. V. (2018) Sharp water column stratification with an extremely dense microbial population in a small meromictic lake, Trekhtzvetnoe. *Environmental Microbiology*, 20(10): 3784–3797

Strelkov P., Stogov I., Krasnova E., Movchan E., Polyakova N., Goldin S., Ivanov M., Ivanova T., Malavenda S., Fedyuk M., Shunatova N. (2019) Rapid unpredicted changes in the stratification of marine lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea) through the early 21st century. *Polar Research*, 38: 3394

Suntio L. R., Shiu W. Y., Mackay D. (1988) A review of the nature and properties of chemicals present in pulp mill effluents. *Chemosphere*, 17(7): 1249–1290

Wania F., Mackay D. (1995) A global distribution model for persistent organic chemicals. *Science of the Total Environment*, 160–161: 211–232

EDN: HUJLRU

УДК 56.074.6

Reconstruction of the Dynamics of Fires in the Southern Taiga Subzone of Western Siberia from the Late Glacial to the Present Based on Bottom Sediments of Lake Shchuchye

Maria A. Pupysheva^{a*}, Tatiana A. Blyakharchuk^{a, b}

^a*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk, Russian Federation*

^b*National Research Tomsk State University
Tomsk, Russian Federation*

Received 27.03.2025, received in revised form 25.07.2025, accepted 10.09.2025

Abstract. This article presents the results of reconstructing the long-term dynamics of paleofires in the southern taiga subzone of Western Siberia (Tomsk Oblast) based on the analysis of bottom sediments from Lake Shchuchye. Radiocarbon dating indicates that sediment formation began approximately 13,200 cal BP, spanning the end of the Late Glacial and the entire Holocene. Lake Shchuchye itself formed around 12,400 cal BP. Through macro-charcoal and radiocarbon analyses, 15 local fire episodes were identified, with their timing and fire intensity determined. Throughout the existence of Lake Shchuchye, six periods of high pyrogenic activity were observed: 12,300–11,100, 8,900–8,700, 5,800–5,500, 5,100–4,800, 2,800–2,500 and 1,250–1,000 cal BP. Temporal distribution of local fires was uneven. The fire dynamics data from the area of Lake Shchuchye were compared with the previously published reconstructions of climate, vegetation and regional fires for the same study area. The analysis revealed that the most intense fires occurred at the end of the Younger Dryas and the beginning of the Preboreal period of the Holocene (12,300–11,100 cal BP) in treeless or partially forested open landscapes under dry and cold climatic conditions. The results demonstrate a direct influence of climate change on fire occurrence and intensity, as well as on vegetation cover changes. The periods of high pyrogenic activity predominantly coincided with dry climatic intervals (12,300–11,100, 8,900–8,700, 5,800–5,500, 5,100–4,800 and 1,250–1,000 cal BP), whereas wet periods generally inhibited fire spread in the Lake Shchuchye area.

Keywords: Western Siberia, paleofires reconstruction, CharAnalysis, macro-charcoal analysis, radiocarbon dating.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: 455207@mail.ru

ORCID: 0009-0009-5189-0895 (Pupysheva M.); 0000-0001-7650-1600 (Blyakharchuk T.)

Acknowledgements. The study was funded by the state budget theme IMCES SB RAS № FWRG-2021–0003.

The authors are grateful to P. A. Blyakharchuk, S. N. Kirpotin for their contribution to organization and implementation of fieldwork at Lake Shchuchye. They also thank Maarten van Hardenbroek for his participation in field research and radiocarbon dating of samples.

Citation: Pupysheva M. A., Blyakharchuk T. A. Reconstruction of the dynamics of fires in the southern taiga subzone of Western Siberia from the Late Glacial to the present based on bottom sediments of Lake Shchuchye. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 303–315. EDN: HUJLRU



Реконструкция динамики пожаров в южнотаежной подзоне Западной Сибири с позднеледникового до современности (на примере отложений озера Щучье)

М. А. Пупышева^а, Т. А. Бляхарчук^{а, б}

*^аИнститут мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
Российская Федерация, Томск*

*^бНациональный исследовательский
Томский государственный университет
Российская Федерация, Томск*

Аннотация. В данной статье представлены результаты реконструкции долговременной динамики палеопожаров в южнотаежной подзоне Западной Сибири (Томская область) на примере анализа донных отложений озера Щучье. Согласно данным радиоуглеродного датирования, формирование исследованной толщи отложений на месте современного озера Щучье началось 13200 калиброванных лет назад (кал.л.н.), охватив конец позднеледникового и весь голоцен. Само озеро Щучье как водоем возникло около 12400 кал.л.н. На основе проведенного макроуглеродного и радиоуглеродного анализов выявлено 15 локальных пожарных эпизодов, а также определено время их возникновения и интенсивность пожаров. За весь период существования озера Щучье отмечено шесть периодов высокой пирогенной активности: 12300–11100, 8900–8700, 5800–5500, 5100–4800, 2800–2500, 1250–1000 кал.л.н. Распределение количества пожаров неравномерно по времени. Полученные данные по динамике пожаров в районе ключевого участка «Озеро Щучье» были также сопоставлены с опубликованными ранее реконструкциями климата, растительности и региональных пожаров для исследуемого разреза. Выявлено, что наиболее интенсивные пожары происходили в конце позднего дриаса – начале пребореального периода голоцена на безлесных или частично облесенных открытых пространствах (12300–11100 кал.л.н.) при сухих и холодных климатических условиях. Полученные результаты показали непосредственное влияние климатических изменений на возникновение и интенсивность пожаров, а также на смену растительного покрова. Выделенные периоды с высокой пирогенной

активностью в основном приходятся на время сухих климатических условий (12300–11100, 8900–8700, 5800–5500, 5100–4800, 1250–1000 кал.л.н.). Влажные климатические условия в целом сдерживали распространение пожаров в районе озера.

Ключевые слова: Западная Сибирь, реконструкция палеопожаров, CharAnalysis, макроугольковый анализ, радиоуглеродное датирование.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке государственной бюджетной темы ИМКЭС СО РАН № FWRG-2021–0003.

Авторы выражают глубокую благодарность П. А. Бляхарчуку, С. Н. Кирпотину, внесшим большой вклад в организацию и проведение полевых работ на озере Щучье. Авторы благодарят Маартена ван Харденбрука за участие в полевых исследованиях и радиоуглеродном датировании образцов.

Цитирование: Пупышева М. А. Реконструкция динамики пожаров в южнотаежной подзоне Западной Сибири с позднеледниковья до современности (на примере отложений озера Щучье) / М. А. Пупышева, Т. А. Бляхарчук // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 303–315. EDN: HUIJLRU

Введение

С конца XX века и по настоящее время в России наблюдается рост числа лесных пожаров (Kharuk et al., 2021). Такая тенденция характерна и для бореальной зоны Западной Сибири. Только за период 1999–2019 гг. в лесах Сибири произошло 114 000 пожаров, в результате которых выгорел лес на площади около 120 000 км² (Kharuk et al., 2021). Изменение климатических условий, сопровождающееся засушливыми периодами и интенсификацией грозовой активности, вызвало рост числа лесных пожаров в Сибири (Kharuk et al., 2021). К концу текущего века в России ожидается постепенное увеличение длительности и интенсивности пожароопасных периодов (Шерстюков, Шерстюков, 2014), что может привести к разрушительным последствиям для природной среды, общества и экономики. При этом пожары являются естественным процессом в природных экосистемах, необходимым для их развития и существования (Бондур и др., 2020). Однако современных сведений о пожарах недостаточно для построения долгосрочных моделей пожарной активности и предотвращения

возможных негативных последствий. Поэтому необходимо всестороннее изучение динамики пожаров в историческом аспекте, охватывая период с позднеледниковья до современности. В связи с этим возникает потребность в определении фонового уровня динамики пожаров в течение всего голоцена для моделирования будущих пожароопасных ситуаций. Для этого необходимы данные по долговременной динамике пожаров, полученные на основе анализа макроугольковых частиц в озерных отложениях (Marlon, 2020). Подсчитанные в отложениях частицы макроугольков (размером более 125 мкм) позволяют реконструировать историю локальных пожаров (Mooney, Tinner, 2011).

В качестве объекта изучения нами выбраны отложения озера Щучье, расположенного в Обско-Иртышской южнотаежной провинции лесной зоны Западной Сибири (Исаченко, 2014) в пределах Томской области. Для данной территории уже проводился ряд исследований по реконструкции палеопожаров на примере отложений трех болот: Плотниково, Рыбное и Улук-Чаях (Feurdean et al., 2019, 2020, 2022), однако данные реконструк-

ции, в отличие от озера Щучье, не охватывали период с позднеледниковья до современности. Поэтому целью данного исследования является реконструкция динамики локальных пожаров в южной тайге Западной Сибири на фоне изменения климата и растительного покрова за последние 13200 калиброванных лет (кал.л.) с использованием современных методов обработки и анализа данных.

Материалы и методы исследования

Район исследования

Озеро Щучье расположено в пределах Чулымской наклонной равнины Западной Сибири в 3,5 км к востоку от поселка Красный Яр (Томская область) (рис. 1). Ключевой участок исследования находится в среднем течении реки Обь в 70 км на северо-запад от г. Томска

и лежит на водораздельном участке в 7 км к востоку от реки Обь. Растительность по берегам озера представлена березово-сосновым и сосново-березовым заболоченным лесом. В окрестностях озера расположены переходные болота (сфагново-разнотравное, древесно-кустарничково-сфагново-травяное и сосново-сфагново-осоковое).

Материалы исследования

Для реконструкции долговременной истории палеопожаров и выявления достоверного возраста донных отложений озера Щучье проведены экспедиционные работы в марте 2020 г., во время которых был отобран керн донных отложений мощностью 346 см для дальнейшей обработки в лаборатории. Отбор керна озерных отложений проводил-

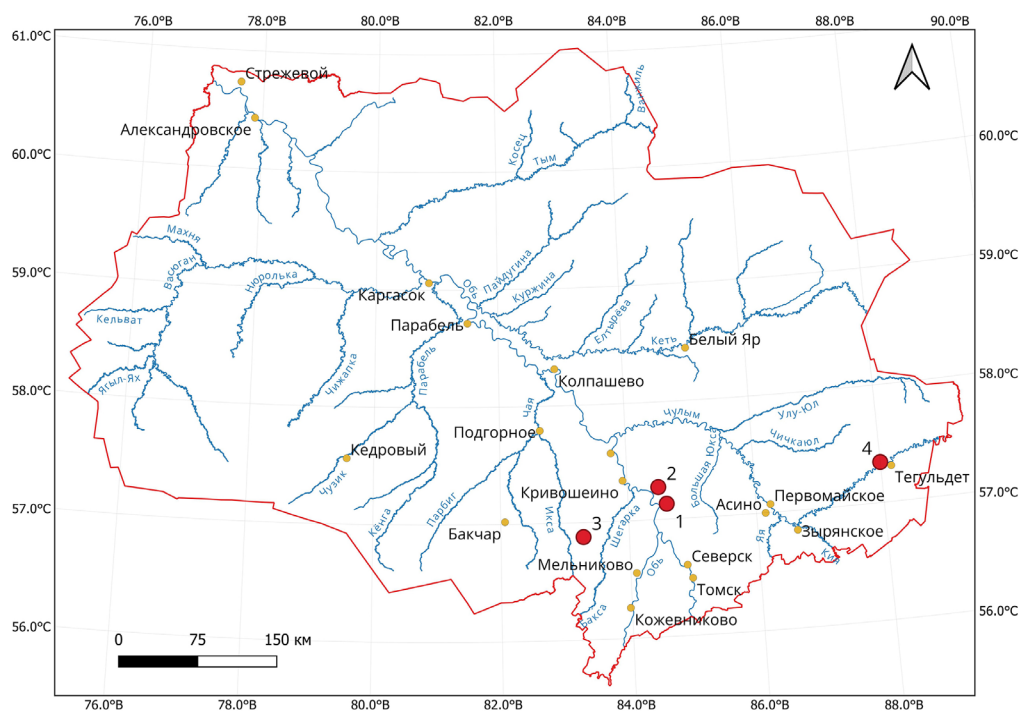


Рис. 1. Участки исследования в южнотаежной подзоне на карте-схеме Томской области: 1 – озеро Щучье; 2 – болото Рыбное (Feurdean et al., 2020); 3 – болото Плотниково (Feurdean et al., 2019); 4 – болото Улук-Чаях (Feurdean et al., 2022)

Fig. 1. Study sites in the southern taiga zone in Tomsk Oblast. 1 – Lake Shchuchye; 2 – Rybnoye swamp (Feurdean et al., 2020); 3 – Plotnikovo swamp (Feurdean et al., 2019); 4 – Ulukh-Chayakh swamp (Feurdean et al., 2022)

ся со льда с помощью поршневого озерного бура системы Wright. Отбор непрерывной серии образцов из керна донных отложений был проведён в полевой лаборатории научной станции Кайбасово (ТГУ). Всего было получено 130 образцов донных отложений для палеопожарных исследований.

Радиоуглеродное датирование

Для изучаемого разреза было получено 8 радиоуглеродных датировок, выполненных в центре экологических исследований в Ист-Килбрайде, Шотландия, Великобритания методом УМС (табл.). На основе радиоуглеродных дат, откалиброванных в программном пакете Bacon (Blaauw, Christen, 2011) в пространстве R version 4.0.4 (R Core Team, 2020), построена глубинно-возрастная модель донных отложений разреза «Озеро Щучье» и рассчитан калиброванный возраст каждого образца (рис. 2).

Метод макроуголькового анализа и статистическая обработка данных в программном пакете CharAnalysis

Для реконструкции долговременной динамики локальных палеопожаров применялся метод макроуголькового анализа отложений

(Mooney, Tinner, 2011; Marlon, 2020). Образцы (объемом 2 см³) отбирались непрерывно по всей колонке донных отложений через каждые 1–5 см. После промывания дистиллированной водой и просеивания через сито с диаметром ячеек 125 мкм в суспензию добавляли 10 %-ный раствор пирофосфата натрия (Na₄P₂O₇) объемом 15 мл и оставляли на сутки с последующим промыванием дистиллированной водой. Затем добавляли 6 %-й раствор перекиси водорода H₂O₂ объемом 20 мл и выдерживали еще двое суток. Такая обработка обесцвечивает всю органику, но сохраняет черный цвет угольков, которые становятся хорошо различимыми и могут быть подсчитаны под бинокулярным микроскопом при увеличении x45 с использованием камеры Богорова. В каждом образце подсчитывались все найденные частицы макроугля (5017 частиц в 130 образцах). После этого осуществлялась статистическая обработка полученных данных в программном пакете CharAnalysis (Higuera, 2009) в пространстве R (R Core Team, 2020). В качестве хронологической основы использовались данные глубинно-возрастной модели отложений разреза «Озеро Щучье» (рис. 2). Для построения графика динамики пожаров произведена интерполяция значений концен-

Таблица. Радиоуглеродные даты донных отложений разреза «Озеро Щучье» (Blyakharchuk et al., 2024)

Table. Radiocarbon dating of the bottom sediments from the Lake Shchuchye section (Blyakharchuk et al., 2024)

Лабораторный номер образца	Глубина отбора образца, см	Возраст, 14C лет назад	Калиброванный возраст по Bacon (кал.л.н.)
SUERC-122375	35	2103±24	2127–1995
SUERC-122376	65	3141±25	3445–3259
SUERC-122377	95	4144±24	4823–4575
SUERC-98422	125	4666±29	5465–5320
SUERC-122381	160	4871±21	5654–5581
SUERC-122382	190	8311±25	9436–9145
SUERC-98423	230	10005±29	11694–11310
SUERC-99312	326	10806±36	12823–12721

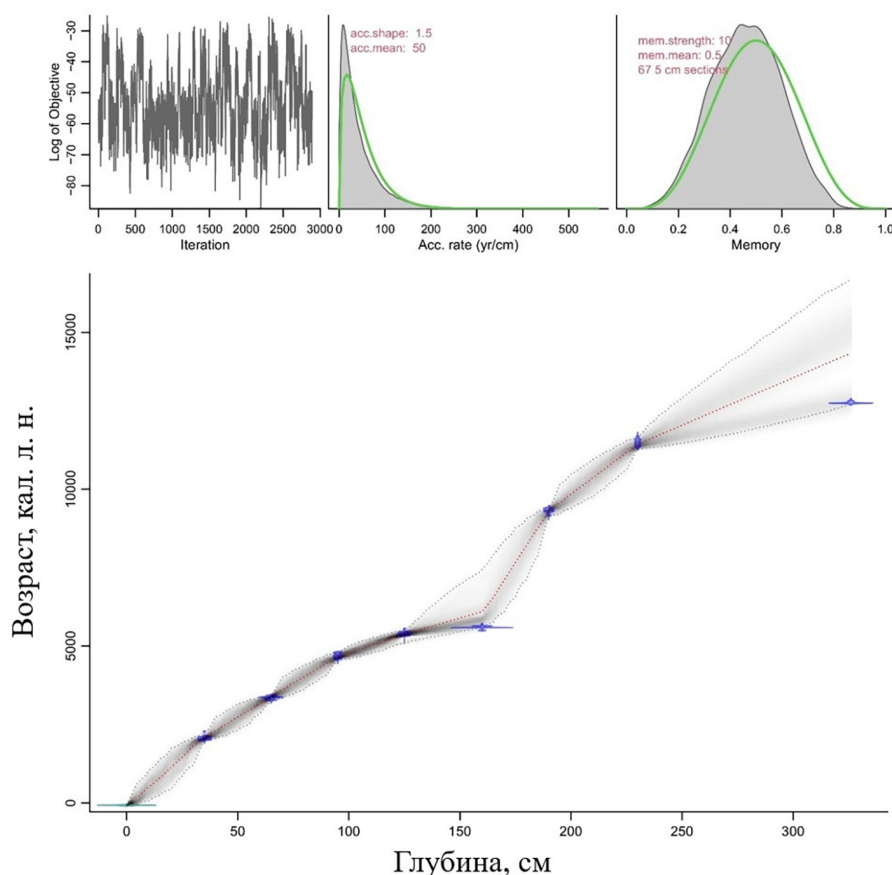


Рис. 2. Глубинно-возрастная модель донных отложений разреза «Озеро Щучье» (Blyakharchuk et al., 2024)

Fig. 2. Depth-age model of the bottom sediments from the Lake Shchuchye section (Blyakharchuk et al., 2024)

трации макроугольков, глубины отбора образцов и их датировок к единому временному разрешению – 100 лет на образец. При расчетах фоновых и пороговых значений скоростей аккумуляции макрочастиц угля применялась статистическая функция LOWESS (локально-взвешенная линейная регрессия) с периодом сглаживания 1000 лет. Пороговые значения рассчитали согласно Гауссовой модели рассеивания примесей с временным окном (в данном случае окно составило 13000 лет). Для статистической достоверности временного окна использован безразмерный индекс отношения сигнала к шуму (SNI) (Kelly et al., 2011). В данном случае индекс составил от 3 до 4,4, что удовлетворяет статистическим

требованиям анализа. В качестве порога мы установили 99-й перцентиль распределения шумов (Blyakharchuk et al., 2024).

Результаты и обсуждение

Для реконструкции долговременной динамики палеопожаров в южнотаежной подзоне Западно-Сибирской равнины использованы полученные нами результаты радиоуглеродного, макроуголькового и статистического анализов отложений разреза «Озеро Щучье», визуализированные в виде графиков и диаграмм на равномерной глубинно-возрастной шкале (рис. 3–4). Для сопоставления динамики пожаров с динамикой климата, растительного покрова

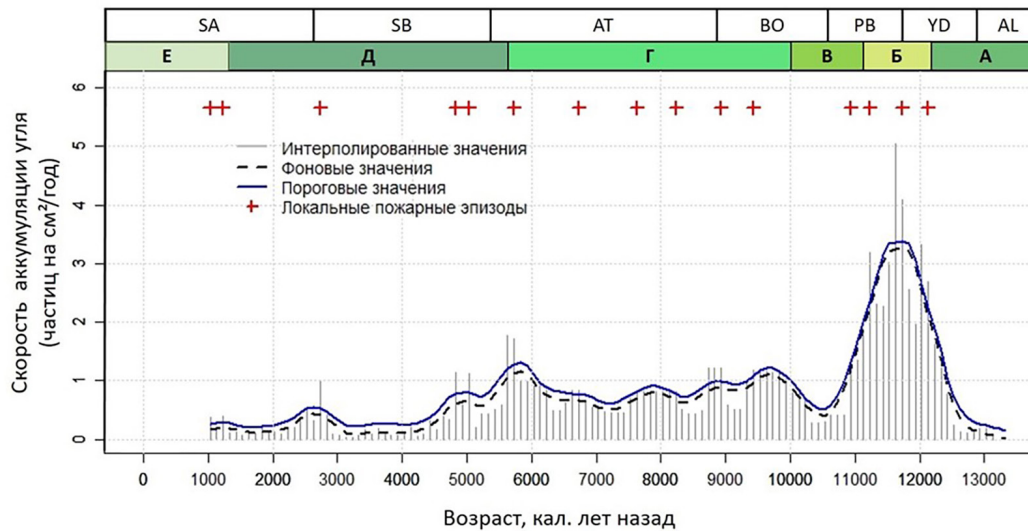


Рис. 3. Сопоставление данных реконструкции долговременной динамики локальных пожаров в районе озера Щучье с динамикой растительного покрова. Преобладающие растительные ассоциации (Blyakharchuk et al., 2024): А – лиственнично-еловая тундро-лесостепь; Б – кустарниково-березовая лесостепь; В – березовые леса; Г – сосново-березовые леса; Д – березово-пихтово-кедровые и сосновые леса; Е – сосново-кедровые леса. Периоды: AL – аллеред, YD – поздний дриас, PB – пребореальный, BO – бореальный, AT – атлантический, SB – суббореальный, SA – субатлантический

Fig. 3. Comparison of reconstructed long-term dynamics of local fires in the Lake Shchuchye area with vegetation cover dynamics. Predominant plant associations (Blyakharchuk et al., 2024): А – larch-spruce tundra-forest-steppe; Б – shrub-birch forest-steppe; В – birch forests; Г – pine-birch forests; Д – birch-fir-cedar and pine forests; Е – pine-cedar forests. Periods: AL – Allerød, YD – Younger Dryas, PB – Preboreal, BO – Boreal, AT – Atlantic, SB – Subboreal, SA – Subatlantic

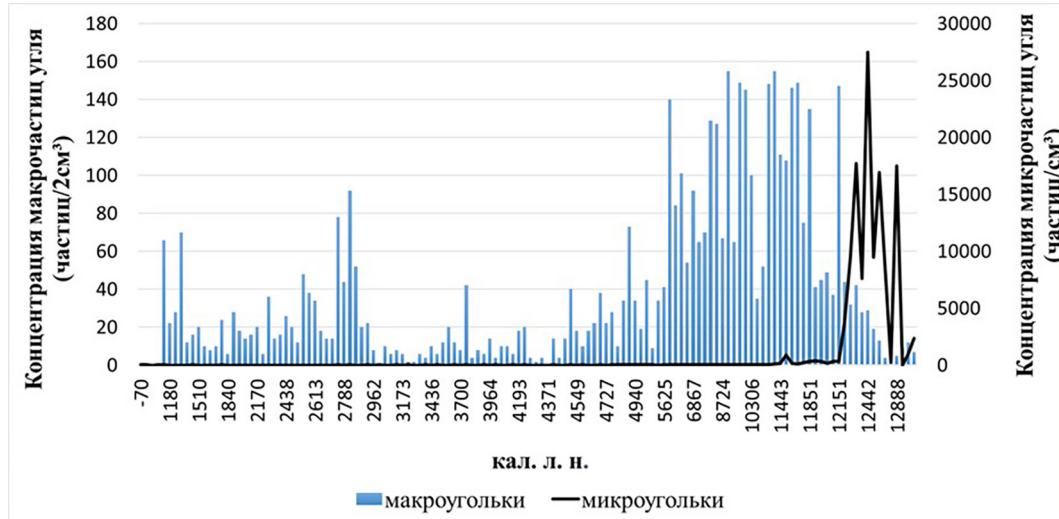


Рис. 4. Содержание микро- и макроугольковых частиц в донных отложениях озера Щучье

Fig. 4. Micro- and macro-charcoal particle content in the bottom sediments from Lake Shchuchye

и региональных пожаров использованы ранее опубликованные реконструкции, выполненные по данным разреза «Озеро Щучье» (Blyakharchuk et al., 2024). Кроме того, автором сопоставлены полученные данные с опубликованными палеопожарными реконструкциями для южной тайги Томской области на примере отложений трех болот: Плотниково, Рыбное и Улук-Чаях (Feurdean et al., 2019, 2020, 2022). Ключевой участок «Озеро Щучье» расположен в 78 км на северо-восток от болота Плотниково, в 17 км на юго-восток от болота Рыбное и в 205 км на запад от болота Улук-Чаях (рис. 1). Кроме того, авторами проведено сравнение с опубликованными работами по динамике палеопожаров в средней тайге (Turunen et al., 2001; Pitkänen et al., 2002; Amon et al., 2020; Лойко и др., 2022; Пупышева, Бляхарчук, 2024) и в подтайге Западной Сибири (Konstantinov et al., 2019).

Согласно данным радиоуглеродного датирования и проведенным расчетам калибровок, формирование исследованной толщи отложений на месте современного озера Щучье началось 13200 калиброванных лет назад (кал.л.н.), охватив конец позднеледниковья и весь голоцен. Хотя само озеро Щучье как водоем возникло около 12400 кал.л.н. (Blyakharchuk et al., 2024).

Результаты расчета изменения скорости аккумуляции частиц макроугольков с помощью программного пакета CharAnalysis (Higuera, 2009) представлены на рис. 3. С помощью CharAnalysis выявлено 15 локальных пожарных эпизодов: 12100, 11700, 11200, 10800, 9400, 8900, 8200, 7550, 6700, 5650, 5050, 4800, 2750, 1200, 1050 кал.л.н. (рис. 3). На основе скорости аккумуляции макроугольков отмечено 6 периодов высокой пирогенной активности: 12300–11100, 8900–8700, 5800–5500, 5100–4800, 2800–2500, 1250–1000 кал.л.н.

В результате проведенных исследований выделены семь основных этапов динамики пожаров в окрестностях ключевого участка «Озеро Щучье» на фоне изменения климата и растительного покрова с позднеледниковья до современности (рис. 3):

1. В аллереде (AL) 13200 кал.л.н. самого озера еще не существовало – в это время происходило формирование подстилающих минеральных отложений. Под влиянием холодного и сухого климата в окрестностях исследуемого участка доминировала лиственнично-еловая тундро-лесостепь (Blyakharchuk et al., 2024). Локальные пожары в этот период не отмечены. Однако микроугольковый анализ (рис. 4) показал высокий уровень региональных пожаров в данное время (Blyakharchuk et al., 2024). Вероятно, обилие микроугольков в отложениях этого времени могло быть связано с крупными региональными пожарами, отмеченными также в исследованиях для подтаежной подзоны Западной Сибири в пределах Томской области (Konstantinov et al., 2019).

2. В середине позднего дриаса (YD) 12400 кал.л.н. на месте современного озера Щучье возник палеоводоем, по берегам которого произрастала ель. Однако уровень воды в водоеме был еще низким. Холодный и сухой климат позднего дриаса способствовал исчезновению ели и господству открытых поlynно-кустарничковых растительных сообществ в середине периода (Blyakharchuk et al., 2024). К концу позднего дриаса климат стал теплее, что привело к постепенному распространению ландшафтов кустарниково-березовой лесостепи (рис. 3). Увеличение биомассы растительного покрова в условиях сухого климата способствовало повышению интенсивности пожаров и привело к одному локальному пожарному эпизоду – 12100 кал.л.н.

3. В пребореальном периоде (PB) голоцена (11700–10500 кал.л.н.) климат стал теплее по сравнению с YD. Увеличение лесного покрова привело к интенсификации пожаров в пределах ключевого участка при достаточно аридном климате (рис. 3) (Blyakharchuk et al., 2024). В это время наблюдался максимум интенсивности пожаров (по уровню аккумуляции макроугольковых частиц – до 5 частиц на $\text{см}^2/\text{год}$), приведший к двум локальным пожарам: 11700, 11200 кал.л.н. Именно 11200 кал.л.н. наблюдался холодный и сухой климатический период в районе озера, согласно количественным реконструкциям палеоклимата (Blyakharchuk et al., 2024). Данный период пожарной активности совпал и с динамикой региональных пожаров (рис. 4). К концу пребореала климат стал более влажным, что вызвало смену растительного покрова лесостепи на березовые леса и снижение интенсивности пожаров в регионе (рис. 3). Однако данные условия не помешали возникнуть одному локальному пожарному эпизоду 10800 кал.л.н.

Следует отметить, что в пребореальном периоде голоцена в среднетаежной подзоне Западной Сибири в районе озера S14 (Ханты-Мансийский автономный округ-Югра – ХМАО) (Пупышева, Бляхарчук, 2024) также отмечен пик пожарной активности (до 7 частиц на $\text{см}^2/\text{год}$). Одновременно горели леса в пределах озер Щучье и S14 в период 11500–11100 кал.л.н., что может свидетельствовать о региональном масштабе возгораний в таежной зоне.

4. В бореальном периоде (BO) голоцена (10500–8800 кал.л.н.) происходило увеличение количества осадков и длительности безморозного периода (согласно количественным реконструкциям палеоклимата) (Blyakharchuk et al., 2024). В это время заметно снизилась интенсивность пожаров в южной тайге (от 2 до 0,5 частиц на $\text{см}^2/\text{год}$)

(рис. 3). Около 10000 кал.л.н. березовые леса сменились на сосново-березовые. Во второй половине бореала интенсивность пожаров увеличилась (с 0,5 до 1,2 частицы на $\text{см}^2/\text{год}$), вероятно, за счет холодных, но достаточно сухих климатических условий в районе озера (Blyakharchuk et al., 2024). В это время реконструировано два локальных пожарных эпизода – 9400, 8900 кал.л.н. Однако значений, превышающих пороговые, немного больше, чем определила программа, что может свидетельствовать о серии небольших локальных пожаров в пределах исследуемого ключевого участка в конце бореала (рис. 3).

Приведенная тенденция снижения пожарной активности в таежной зоне в бореале подтверждается и другими опубликованными исследованиями (Пупышева, Бляхарчук, 2024). Вероятно, влажные климатические условия и активизация процессов заболачивания в центральной части Западной Сибири привели к уменьшению интенсивности пожаров в регионе (Ахтерьякова, Лещинский, 2014).

5. В атлантическом периоде (AT) голоцена (8800–5300 кал.л.н.) реконструировано четыре локальных пожара – 8200, 7550, 6700, 5650 кал.л.н. (со скоростью аккумуляции угольков от 1,8 до 0,7 частиц на $\text{см}^2/\text{год}$). В это время в окрестностях ключевого участка «Озеро Щучье» произрастали сосново-березовые леса (рис. 3). Период высокой пирогенной активности произошел в конце атлантического периода голоцена (5800–5500 кал.л.н.), для которого реконструировано сухое похолодание на данной территории (Blyakharchuk et al., 2024). С этого времени и до 1300 кал.л.н. в растительном покрове преобладали березово-кедрово-пихтовые и сосновые леса (рис. 3). Полученные нами данные по динамике пожаров в атлантическом периоде голоцена подтверждаются и другими опубликованными исследованиями для южно- и среднетаежной

подзон Западной Сибири. Так, в районе болота Рыбное реконструирован период высокой интенсивности пожаров 7500–6500 кал.л.н. (Feurdean et al., 2020), а для болота Улук-Чаях – 5500 кал.л.н. (Feurdean et al., 2022).

Пожары регионального уровня в атлантическом периоде отмечены и в других работах для среднетаежной подзоны равнины: 8000–7700 кал.л.н. (по микроугольковым данным отложений озера Светленькое) (Amon et al., 2020), 8000–7000 кал.л.н. (по обнаруженным прослойкам древесного угля в отложениях Салым-Юганского болота) (Pitkänen et al., 2002), 7550–7450 кал.л.н. (по макроугольковым данным отложений озера S14, ХМАО) (Пупышева, Бляхарчук, 2024). Это подтверждает наличие крупных пожаров регионального и локального масштаба в данное время в пределах таежной зоны Западной Сибири.

6. В суббореальном периоде (SB) голоцена (5300–2600 кал.л.н.) в пределах озера произошло три локальных пожарных эпизода: 5050, 4800, 2750 кал.л.н. при довольно низкой интенсивности пожаров (от 1,2 до 0,3 частицы на см²/год) (рис. 3). Первые два пожарных эпизода здесь произошли в период теплых климатических условий суббореала (Blyakharchuk et al., 2024). Дальнейшее увеличение количества осадков и похолодание климата 4000–3000 кал.л.н., вероятно, спровоцировали снижение интенсивности пожаров. Тем не менее в конце суббореала реконструирован локальный пожар (2750 кал.л.н.) со скоростью аккумуляции угольков до 1 частицы на см²/год.

Полученные нами новые палеопожарные данные для суббореального периода подтверждаются и другими исследованиями, охватывающими среднетаежную и южнотаежную подзоны Западной Сибири. В Сургутском районе отмечена пожарная активность в период 4600–4400 кал.л.н. (Лойко и др.,

2022), в интервале между 4560–3865 кал.л.н. (Turunen et al., 2001), а также 3600–3400 кал.л.н. (Лойко и др., 2022). В пределах озера S14 в ХМАО реконструированы локальные пожары 5100, 4500, 3800, 3200, 3000 кал.л.н. (Пупышева, Бляхарчук, 2024). В южнотаежной подзоне Томской области в пределах болота Рыбное отмечено увеличение интенсивности пожаров 4500 и 3500 кал.л.н. (Feurdean et al., 2020), а в окрестностях болота Улук-Чаях – 4500–4000 кал.л.н. (Feurdean et al., 2022).

7. В субатлантическом периоде (SA) голоцена (2600 кал.л.н. – до настоящего времени) фоновый уровень пожаров в районе ключевого участка «Озеро Щучье» достиг минимальных значений (рис. 3). В период Средневековой климатической аномалии произошло два локальных палеопожара – 1200 и 1050 кал.л.н. Примерно в это же время (1300 кал.л.н.) ведущую роль в растительном покрове заняли сосновые и кедровые леса (рис. 3) (Blyakharchuk et al., 2024). В средней тайге равнины в пределах озера S14 реконструированы локальные пожары 1150 кал.л.н. (Пупышева, Бляхарчук, 2024). Палеопирогенные события последнего тысячелетия нашими данными не охарактеризованы из-за недостаточного количества материала для анализа в верхних полужидких озерных отложениях. Однако в опубликованных исследованиях для южной тайги равнины говорится об увеличении пожарной активности к настоящему времени (Feurdean et al., 2020, 2022).

Полученные результаты по реконструкции пожаров в южной тайге Западной Сибири на примере отложений ключевого участка «Озеро Щучье» за 13200 кал.л. показали непосредственное влияние климатических изменений на возникновение и интенсивность пожаров, а также на смену растительного покрова. Выделенные периоды с высокой пи-

рогенной активностью в основном произошли во время сухих климатических условий (12300–11100, 8900–8700, 5800–5500, 5100–4800, 1250–1000 кал.л.н.). Влажные климатические условия в целом сдерживали распространение пожаров в районе озера.

Заключение

Согласно полученным результатам, в аллереде озера Щучье еще не существовало – в это время формировались подстилающие минеральные отложения (13200 кал.л.н.). В этот период полностью отсутствовала локальная пожарная активность при доминирующем тундро-лесостепном растительном покрове. При этом климат был намного холоднее и суше современного. В это же время зафиксирована высокая концентрация частиц микроугольков, свидетельствующая о региональном характере возгораний (Konstantinov et al., 2019). Само озеро Щучье образовалось 12400 кал.л.н. в криоаридных условиях позднего дриаса. Самые интенсивные локальные пожары в районе ключевого участка произошли в конце позднего дриаса – начале пребореального периода голоцена на безлесных или частично облесенных открытых пространствах (12300–11100 кал.л.н.). В это время пожары были более частыми и интенсивными. Это могло быть связано как с сухими климатическими условиями, так и с доминированием лесостепной растительности, служившей в качестве горючего материала для пожаров. Примечательно, что в среднетаежной подзоне равнины в районе озера S14 (ХМАО) также реконструирован пик пожарной активности в начале пребореального периода. Одновременная серия возгораний в пределах озер Щучье и S14 выявлена 11500–11100 кал.л.н.

В раннем голоцене с увеличением количества атмосферных осадков и распространением сомкнутых березовых лесов количество пожаров в южной тайге резко уменьшилось (11200–10000 кал.л.н.). Однако в среднем голоцене, по мере распространения и доминирования сосновых лесов и увеличения аридности климата, интенсивность пожаров вновь возросла (от 0,5 до 1,7 частиц на $\text{см}^2/\text{год}$). О наличии пожаров в южнотаежной подзоне равнины в данное время свидетельствуют опубликованные работы (Feurdean et al., 2019, 2020, 2022). В исследованиях отмечены периоды интенсификации палеопожаров, которые совпадают с полученными нами данными для южной тайги Западной Сибири. В позднем голоцене интенсивность пожаров в районе озера резко снизилась (от 0,1 до 1,1 частиц на $\text{см}^2/\text{год}$). Это могло быть связано с более влажными климатическими условиями. Палеопожарные данные за последние 1000 кал.л. не охарактеризованы из-за недостаточного количества материала в верхних полужидких образцах. Однако анализ опубликованных работ для южной тайги Западной Сибири свидетельствует об увеличении интенсивности пожаров к настоящему времени (Feurdean et al., 2020). Несмотря на то что полученные результаты показали непосредственное влияние климатических изменений на интенсивность и частоту пожаров, сами пожары оказывали воздействие на смену растительного покрова в регионе. Для более детального выявления взаимосвязей между пожарами, климатом и растительным покровом в южнотаежной подзоне Западной Сибири требуются дополнительные исследования по реконструкции палеэкологических условий на примере новых участков исследования.

Список литературы / References

- Ахтерьякова А. В., Лещинский С. В. (2014) Результаты комплексного исследования двух голоценовых торфяников Тобольско-Прииртышского литофациального района. *Вестник Томского государственного университета*, 385: 171–180 [Akhteryakova A. V., Leshchinskiy S. V. (2014) Results of the comprehensive research on two Holocene peatlands of the Tobolsk-Irtysh lithofacies area. *Tomsk State University Journal* [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta], 385: 171–180 (in Russian)]
- Бондур В. Г., Мохов И. И., Воронова О. С., Ситнов С. А. (2020) Космический мониторинг сибирских пожаров и их последствий: особенности аномалий 2019 г. и тенденции 20-летних изменений. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 492(1): 99–106 [Bondur V. G., Mokhov I. I., Voronova O. S., Sitnov S. A. (2020) Satellite monitoring of Siberian wildfires and their effects: Features of 2019 anomalies and trends of 20-year changes. *Doklady Earth Sciences*, 492(1): 370–375]
- Исаченко А. Г. (2014) Западная Сибирь как объект историко-географического изучения и описания. Статья II. *Известия Русского географического общества*, 146(3): 1–29 [Isachenko A. G. (2014) Western Siberia as an object of historical-geographical study and description. Article II. *Proceedings of the Russian Geographical Society* [Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva], 146(3): 1–29 (in Russian)]
- Лойко С. В., Кузьмина Д. М., Дудко А. А., Константинов А. О., Васильева Ю. А., Курасова А. О., Лим А. Г., Кулижский С. П. (2022) Древесные угли в подзолах средней тайги Западной Сибири как индикатор истории геосистем. *Почвоведение*, 2: 176–192 [Loiko S. V., Kuz'mina D. M., Dudko A. A., Konstantinov A. O., Vasil'eva Y. A., Kurasova A. O., Lim A. G., Kulizhskii S. P. (2022) Charcoals in the Middle Taiga Podzols of Western Siberia as an indicator of geosystem history. *Eurasian Soil Science*, 55(2): 154–168]
- Пупышева М. А., Бляхарчук Т. А. (2024) Реконструкция голоценовой истории палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири по данным макроуголькового анализа озерных отложений. *Геосферные исследования*, 1: 135–151 [Pupysheva M. A., Blyakharchuk T. A. (2024) Reconstruction of the holocene paleo-fire history in the middle taiga subzone of Western Siberia according to the macro-charcoal analysis of lake sediments. *Geosphere Research* [Geosfernye issledovaniya], 1: 135–151 (in Russian)]
- Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б. (2014) Оценки тенденций усиления лесных пожаров в России до конца XXI в. по данным сценарных экспериментов климатических моделей пятого поколения. *Метеорология и гидрология*, 5: 17–30 [Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B. (2014) Assessment of increase in forest fire risk in Russia till the late 21st century based on scenario experiments with fifth-generation climate models. *Russian Meteorology and Hydrology*, 39(5): 292–301]
- Amon L., Blaus A., Alliksaar T., Heinsalu A., Lapshina E., Liiv M., Reitalu T., Vassiljev J., Veski S. (2020) Postglacial flooding and vegetation history on the Ob River terrace, central Western Siberia based on the palaeoecological record from Lake Svetlenkoye. *Holocene*, 30(5): 618–631
- Blaauw M., Christen J. A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6(3): 457–474
- Blyakharchuk T. A., van Hardenbroek M., Pupysheva M. A., Kirpotin S. N., Blyakharchuk P. A. (2024) Late Glacial and Holocene history of climate, vegetation landscapes and fires in South Taiga of

Western Siberia based on radiocarbon dating and multi-proxy palaeoecological research of sediments from Shchuchye Lake. *Radiocarbon*, 67(1): 1–24

Feurdean A., Diaconu A.C., Pfeiffer M., Gałka M., Hutchinson S.M., Butiseaca G., Gorina N., Tonkov S., Niamir A., Tantau I., Zhang H., Kirpotin S. (2022) Holocene wildfire regimes in western Siberia: Interaction between peatland moisture conditions and the composition of plant functional types. *Climate of the Past*, 18(6): 1255–1274

Feurdean A., Florescu G., Tanțău I., Vanni  re B., Diaconu A.C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S. (2020) Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia. *Quaternary Science Reviews*, 244: 106495

Feurdean A., Gałka M., Florescu G., Diaconu A.C., Tanțău I., Kirpotin S., Hutchinson S.M. (2019) 2000 years of variability in hydroclimate and carbon accumulation in western Siberia and the relationship with large-scale atmospheric circulation: A multi-proxy peat record. *Quaternary Science Reviews*, 226: 105948

Higuera P. (2009) *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis*. Bozeman, MT, Montana State University, 27 p.

Kelly R.F., Higuera P.E., Barrett C.M., Hu F.S. (2011) A signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment–charcoal records. *Quaternary Research*, 75(1): 11–17

Konstantinov A., Loiko S., Kurasova A., Konstantinova E., Novoselov A., Istigechev G., Kulizhskiy S. (2019) First findings of buried late-glacial paleosols within the dune fields of the Tomsk Priobye Region (SE Western Siberia, Russia). *Geosciences*, 9(2): 82

Kharuk V.I., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Dvinskaya M.L., Coogan S.C. P., Flannigan M.D. (2021) Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 50(11): 1953–1974

Marlon J.R. (2020) What the past can say about the present and future of fire. *Quaternary Research*, 96: 66–87

Mooney S.D., Tinner W. (2011) The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat*, 7: 9

Pitkänen A., Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K. (2002) Holocene vegetation history from the Salym-Yugan mire area, West Siberia. *Holocene*, 12(3): 353–362

R Core Team (2020) R: a language and environment for statistical computing; R foundation for statistical computing. Vienna. (available at: www.r-project.org/index.html)

Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K., Pitkänen A. (2001) Carbon accumulation in West Siberian mires, Russia. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(2): 285–296

EDN: IAEGMH

УДК 574.5

Carotenoids in Bottom Sediments as Biomarkers of Changes in the Ecosystem of Saline Lake Shira (Siberia, Khakassia)

Vladimir V. Zykov^{a*}, Aleksandr O. Bulkhin^a,
Elena V. Bezrukova^b and Aleksandr A. Shchetnikov^c

^a*Institute of Biophysics SB RAS
Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”
Krasnoyarsk, Russian Federation*

^b*Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
Irkutsk, Russian Federation*

^c*Institute of the Earth’s Crust SB RAS
Irkutsk, Russian Federation*

Received 15.08.2025, received in revised form 28.08.2025, accepted 04.09.2025

Abstract. Layered bottom sediments of the meromictic Lake Shira (Siberia, Khakassia) have well-preserved traces of the lake’s biota. This study focuses on comparison and analysis of photopigments in the lake’s sediments. We examined sediments up to 5,500 years old, as well as recent sediments frozen in situ using a freeze-corer to preserve the upper layers deposited in recent years. Our results show that carotenoid okenone produced by purple sulfur bacteria was present in the oldest sediments (~5500 years old), indicating that the lake was meromictic at that time. The profiles of carotenoids in frozen cores of the upper sediments, compared with the reservoir monitoring data, revealed that increases in okenone content corresponded to the periods of lake level rise, while decreases coincided with the periods of level decline or stabilization. These findings provide useful proxies for reconstructing past water levels and, consequently, paleoclimate humidity in southern Siberia.

Keywords: meromixis, bottom sediments, carotenoids, okenone, paleoreconstructions.

Acknowledgements. The study was funded by the Russian Science Foundation, project № 23–17–00067, <https://rscf.ru/project/23–17–00067>

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: zykovvv@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-3382-9339 (Zykov V.); 0000-0002-8537-0945 (Bulkhin A.); 0000-0001-7370-105X (Bezrukova E.); 0000-0002-4591-6421 (Shchetnikov A.)

Citation: Zykov V. V., Bulkin A. O., Bezrukova E. V., Shchetnikov A. A. Carotenoids in bottom sediments as biomarkers of changes in the ecosystem of saline Lake Shira (Siberia, Khakassia). J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 316–326. EDN: IAEGMH



Каротиноиды в донных отложениях как биомаркеры изменений в экосистеме соленого озера Шира (Сибирь, Хакасия)

**В. В. Зыков^а, А. О. Бульхин^а,
Е. В. Безрукова^б, А. А. Щетников^в**

*^аИнститут биофизики СО РАН
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»*

Российская Федерация, Красноярск

^бИнститут геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН

Российская Федерация, Иркутск

^вИнститут земной коры СО РАН

Российская Федерация, Иркутск

Аннотация. Меромиктическое озеро Шира (Сибирь, Хакасия) обладает слоистыми донными отложениями, хорошо сохранившими в себе следы биоты водоема. Данная работа посвящена сравнению и анализу фотопигментов в донных отложениях озера. Изучены отложения озера Шира возрастом до 5500 лет, а также молодые отложения, замороженные *in situ* с помощью пробоотборника-намораживателя (freeze-corer) для сохранности верхних слоев, осажженных в последние годы. Показано, что каротиноид пурпурных серных бактерий окенон присутствовал в самых древних отложениях возрастом около 5500 лет, следовательно, озеро было меромиктическим в тот период. Профили каротиноидов в замороженных ядрах верхних донных отложений и их сравнение с данными мониторинга водоема показали, что повышение содержания окенона в донных отложениях происходит в периоды повышения уровня озера, тогда как снижение окенона соответствует периодам снижения уровня либо его стабилизации. Выявленные закономерности полезны для реконструкции уровня воды, а следовательно – влажности палеоклимата на территории юга Сибири.

Ключевые слова: меромиксия, донные отложения, каротиноиды, окенон, палеореконструкции.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–17–00067, <https://rscf.ru/project/23-17-00067>

Цитирование: Зыков В. В. Каротиноиды в донных отложениях как биомаркеры изменений в экосистеме соленого озера Шира (Сибирь, Хакасия) / В. В. Зыков, А. О. Бульхин, Е. В. Безрукова, А. А. Щетников // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 316–326. EDN: IAEGMH

Введение

Донные отложения водоемов – ценный источник информации о климатических изменениях в прошлом. С точки зрения палео-лимнологических исследований озеро Шира ценно своими донными отложениями, имеющими слоистую структуру. На сегодняшний день донные отложения водоема изучены по ряду палеоиндикаторов, среди которых – элементный состав, створки диатомовых, пыльца растений (Kalugin et al., 2013; Вершинин, Рогозин, 2014; Hildebrandt et al., 2015; Болобанщикова и др., 2015; Безрукова и др., 2024). Каротиноиды фототрофных организмов, захороненные в донных отложениях, несут дополнительную информацию о состоянии экосистем в различные периоды (Leavitt, Hodgson, 2001). В частности, каротиноиды фототрофных серных бактерий указывают на присутствие сероводорода в фотической зоне водной толщи, следовательно – на устойчивую стратификацию озера (Mallorqui et al., 2005). В донных отложениях озера Шира среди каротиноидов ранее был выявлен окенон – специфический каротиноид пурпурных серных бактерий, которые и в настоящее время присутствуют в хемоклине озера (Зыков и др., 2012; Rogozin et al., 2023). Причем было показано, что окенон присутствует не во всех слоях отложений, следовательно, сероводород отсутствовал в озере в соответствующие периоды. В частности, в слоях, соответствующих периоду документально зарегистрированного снижения уровня воды в начале XX века, окенон не откладывался, что свидетельствует об отсутствии перманентной стратификации в тот период (Зыков и др., 2012). Уровень воды в бессточных озерах реагирует на флуктуации осадков и испарения, а наличие стратификации и ее стабильность зависят, в свою очередь, от колебаний уровня (Last, Ginn, 2005). На основе данных мониторинга вертикальной структуры озера Шира показано, что в периоды роста уровня воды за счет поверхностного при-

тока в озере возникает вертикальный градиент солености, который способствует усилению стратификации и накоплению сероводорода, а следовательно, массовому развитию пурпурных серных бактерий. И наоборот, в периоды стабильного уровня стратификация постепенно ослабевает, содержание сероводорода в водной толще снижается, и численность пурпурных серных бактерий уменьшается (Rogozin et al., 2017). Таким образом, повышенные содержания окенона в озерных отложениях могут свидетельствовать о подъемах уровня воды, следовательно, о периодах увлажнения климата, тогда как отсутствие окенона указывает на постоянный либо снижающийся уровень, следовательно – на более сухие условия. В 2021 г. сотрудниками Института геохимии им. Виноградова были отобраны керны донных отложений суммарной длиной около 2,5 м и возрастом около 5500 лет (Безрукова и др., 2024). Целью данной работы является оценка состава и вертикального распределения каротиноидов фототрофных организмов в отложениях озера Шира, охватывающих этот период времени.

Материалы и методы

Озеро Шира

Озеро Шира (N 54°30', E 90°11') представляет собой бессточный водоем, расположенный на территории Северо-Минусинской котловины в Ширинском районе Республики Хакасия (Российская Федерация). Озеро овальной формы, размером около 5,3 × 9,3 км, площадью около 35,9 км², максимальной глубиной 24 м (2019) (Рогозин и др., 2020). Максимальная глубина озера достигает 25 м при средней глубине 11 м. Соленость воды в эпилимнионе в летнее время составляет около 15 г·л⁻¹, в гипolimнионе около 19 г·л⁻¹, состав воды – сульфатно-хлоридный натриево-магниевый (Rogozin et al., 2010). Водоем питается за счет поверхностного стока, подземных вод и атмос-

ферных осадков, при этом наибольший вклад (40 %) вносит река Сон (Rogozin et al., 2023). Режим перемешивания – меромиктический, в глубинных слоях воды присутствует сероводород, однако в 2015–2016 гг. озеро подверглось полному перемешиванию, и сероводород полностью исчезал в весенне-летний период (Rogozin et al., 2017, 2023). В последующие годы меромиксия восстановилась и до настоящего времени озеро меромиктическое.

Керны донных отложений

В марте 2021 г. с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC (Австрия) был взят керн Shira-I-21 длиной 159 см. Тогда же с помощью керноотборной станции ударно-канатного типа UWITEC (Австрия) был отобран керн Shira-II-21 длиной 244 см, из него была взята нижняя часть (146 см), которая использована в данной работе. Из керна Shira-I-21 были вырезаны образцы толщиной 1 см с шагом 5 см, а из Shira-II-21 отдельные места, прилегающие к интервалам с признаками резких изменений в озере (выраженные границы черных и белых слоев). Кроме того, для исследования слоистой структуры наиболее молодых полужидких слоев были отобраны верхние слои донных отложений до глубины 40 см (керн ICE 2023), замороженные in-situ с помощью пробоотборника-намораживателя (freezecorer), изготовленного в Институте биофизики СО РАН. Данный пробоотбор осуществлялся в марте 2023 г. Из цельного замороженного образца были выпилены вертикальные бруски сечением 3×3 см, которые затем были разрезаны раскаленной нихромовой нитью на поперечные образцы с шагом 1 см по глубине.

Датировка кернов донных отложений

Сотрудниками Института геохимии СО РАН им. Виноградова методом ^{14}C была осуществлена датировка керна Shira-II-21 дон-

ных отложений озера Шира длиной 146 см, отобранного вместе с исследуемыми (Безрукова и др., 2024). По характерным цветным слоям датировка данного керна была экстраполирована на керны Shira-I-21 и Shira-II-21. Датировка замороженного керна была осуществлена по характерному светлому слою на основе данных ранее изученных кернов верхних донных отложений озера Шира (Рогозин и др., 2011; Зыков и др., 2012; Rogozin et al., 2023).

Экстракция пигментов

Перед анализами все образцы донных отложений были лиофильно высушены. Часть образца изымали и гомогенизировали, далее делили на три равные части, в каждой примерно 0,15–0,6 г сухого вещества. Две из них использовали для анализа каротиноидов в двух повторностях. Для этого донные отложения помещались в пробирки-фальконы объемом 15 мл, заливались 5 мл 90 % ацетона и экстрагировались в темных условиях в течение суток (Leavitt, Hodgson, 2001). После пробы были центрифугированы при 9000 g в течение 15 мин. Супернатант изымался и до анализа хранился в пробирках для криохранения объемом 1,8 мл, в темных условиях при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Третья часть гомогенизированной пробы была использована для определения сухого веса образца и содержания органики, которое определялось как потери при прокаливании (Loss On Ignition, LOI_{550}). Проба высушивалась в чаше для выпаривания при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 часов, взвешивалась для определения сухого веса, после чего выдерживалась в муфельной печи при температуре $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 часов для определения LOI_{550} . Полученные данные были использованы для вычисления содержания пигментов в расчете на сухое вещество.

Хроматографический анализ пигментов

Анализ проводился методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на установке Agilent 1200 (Agilent Technologies, Калифорния, США) с диодно-матричным (DAD) детектором, на колонке Eclipse XDB – C-18, средний диаметр частиц 5 мкм, размеры 4,6×150 мм. Элюент и пробы предварительно проходили через пред-колонку Eclipse XDB-C 18, средний диаметр частиц 5 мкм, размеры 4,6×12,5 мм, разделение проводилось при постоянной температуре 40 °С. Хроматографическое разделение проводили по протоколу Wright et al. (1991), предназначенному для разделения фотопигментов морских экосистем.

*Идентификация**и подсчет концентрации пигментов*

Оптическая плотность в подвижной фазе регистрировалась DAD-детектором. Настройки диодной матрицы следующие – длина волны регистрации сигнала – 455 нм (для каротиноидов), длина волны сравнения – 880 нм. Идентификация пигментов осуществлялась на основании времен выхода каротиноидов и их спектров поглощения. Концентрации всех каротиноидов оценивали по калибровке, сделанной для окенона, исходя из того, что оптические свойства всех ксантофиллов не сильно различаются (Mallorqui et al., 2005). Калибровка по окенону произведена на основе стандарта, выделенного из чистой культуры пурпурных серных бактерий *Thiocapsa* из озера Шира (Хакасия) (Зыков и др., 2012). Значения концентрации пигментов определялись в двух повторностях, для анализа использовали среднее арифметическое.

Результаты и обсуждение*Датировка*

В замороженном керне ICE 2023 был обнаружен светлый слой, верхняя граница

которого располагается на глубине 14–15 см (рис. 1). Данный слой ранее отмечался во всех кернах, отобранных с помощью намораживания (Rogozin et al., 2023), и предположительно образовался в результате выпадения в осадок карбонатов во время усыхания озера в начале XX века. Соответственно, верхняя граница данного слоя датируется 1933 годом, когда уровень озера начал расти и выпадение карбонатов прекратилось (Rogozin et al., 2023). На основе расположения этого маркирующего слоя была оценена скорость осадконакопления для керна ICE 2023 (рис. 1). Для кернов Shira-I-21 и Shira-II-21 возраст был оценен ранее на основе радиоуглеродных дат, стыковка кернов осуществлялась на основе профилей рентгено-флуоресцентного сканирования элементного состава в сочетании с расположением визуально-различимых слоев (Безрукова и др., 2024).

Каротиноиды в донных отложениях

В донных отложениях были обнаружены следующие каротиноиды: окенон – пигмент пурпурных серных бактерий (ПСБ) (Зыков и др., 2012); аллоксантин – пигмент криптофитовых водорослей, развивающихся преимущественно в зоне хемоклина, выше анаэробной зоны (Бархатов и др., 2021); лороксантин – пигмент зеленых водорослей, в частности *Botryococcus braunii*, одного из представителей фитопланктона озера; лютеин и зеаксантин – пигменты высшей растительности, а также зеленых микроводорослей и цианобактерий, причем первый преобладает преимущественно в зеленых водорослях, а второй в составе цианобактерий; бета-каротин – один из универсальных каротиноидов, присутствующих в большинстве фототрофов, его концентрация может быть интерпретирована как показатель общей продуктивности экосистемы (Leavitt, Hodgson,

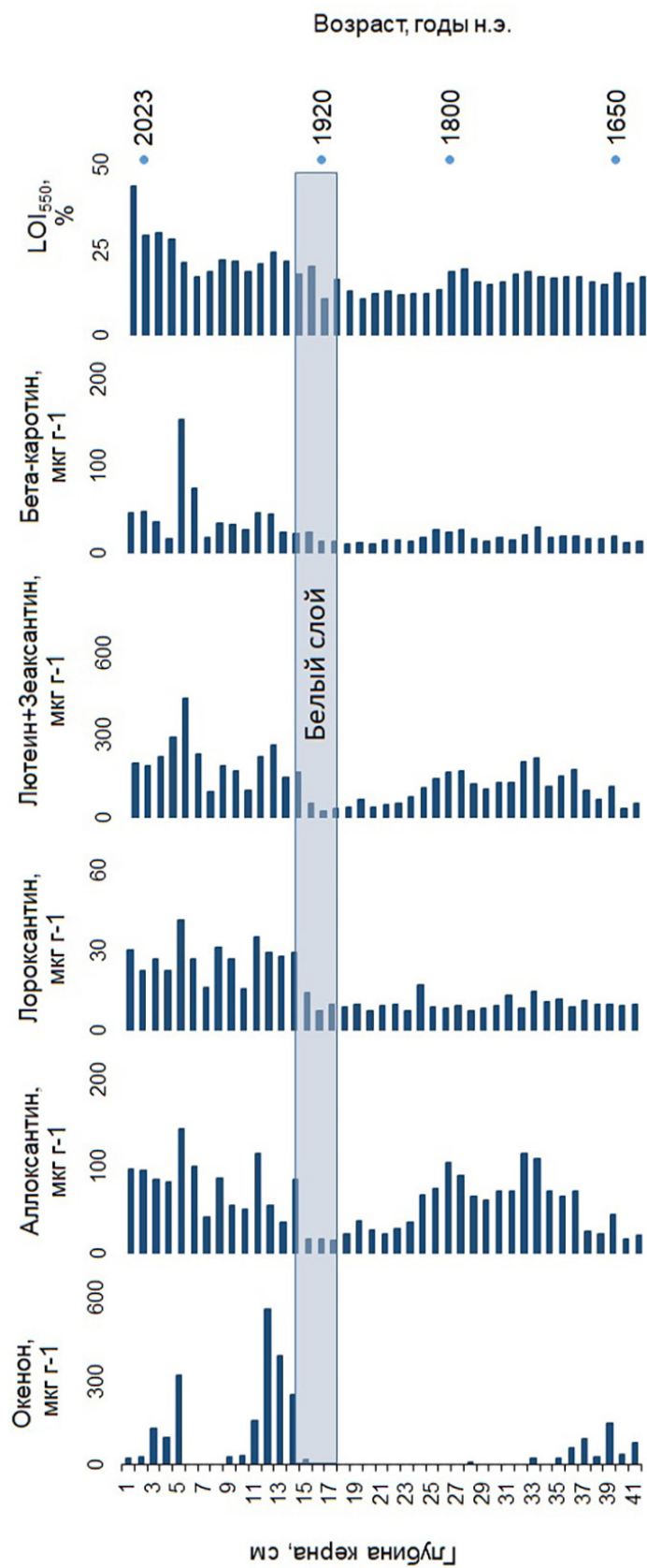


Рис. 1. Профиль вертикального распределения фотопигментов (мкг·г⁻¹) и LOI₅₅₀ в керне донных отложений ICE 2023

Fig. 1. Photopigments (µg of dry w.⁻¹) and LOI₅₅₀ in bottom sediments of Lake Shira, ICE 2023 core

2001). Все каротиноиды, кроме окенона, обнаруживались на всех исследованных глубинах, тогда как окенон на некоторых участках кернов отсутствовал (рис. 1, 2), что свидетельствует о периодических исчезновениях и восстановлениях сероводородной зоны озера.

Изучение состава биомаркеров верхних слоев ледовых кернов представляет интерес, поскольку может быть сопоставлено с динамикой уровня озера и данными мониторинга его вертикальной структуры. Тем самым могут быть выявлены закономерности реакции состава донных отложений на климатически обусловленные изменения уровня воды, что может быть полезно для реконструкции палеоклимата по более древним отложениям. В верхних образцах наблюдается резкое падение содержания окенона (рис. 1). Вероятнее всего, данное явление обусловлено снижением численности пурпурных серных бактерий из-за отмеченного в последние годы углубления положения хемоклина, и соответственно, снижения освещенности в зоне развития этих бактерий (Rogozin et al., 2017, 2023). Отсутствие окенона в «белом» слое на глубине 15 см и нижележащих слоях свидетельствует об отсутствии сероводорода в фотической зоне озера в соответствующий период. Данный факт совпадает со снижением уровня озера, документально зарегистрированным в интервале 1890–1920-х гг. и предположительно связанным с более засушливым климатом в тот период (Rogozin et al., 2017; Babushkina et al., 2017; Rogozin и др., 2018). Поскольку снижение уровня приводит к более глубокому перемешиванию водной толщи в сезонном цикле, вероятно, озеро в этот период не было меромиктическим. Кроме того, нами показано, что при длительном постоянном уровне озера градиент солености в водной толще может ослабевать и, соответственно, стабильность стратификации может снижаться. В результа-

те ухудшаются условия обитания пурпурных серных бактерий, что также приводит к снижению содержания окенона ниже предела обнаружения (Rogozin et al., 2023).

Ранее для озера Шира были проведены пигментные анализы кернов донных отложений, включая как короткие замороженные образцы, так и длинные керны длиной до 1,4 м (Зыков и др., 2012; Rogozin et al., 2023; Zykov, Rogozin, 2024). Наши результаты показали, что в более древних слоях пигментный состав представлен теми же каротиноидами, что и в ранее изученных более молодых отложениях. Структура слоев ледового керна ICE 2023, распределение каротиноидов и LOI₅₅₀ также аналогичны ранее изученным замороженным кернам озера Шира (Rogozin et al., 2023). Для более длинных кернов также наблюдается совпадение пиков и зон с низкими концентрациями окенона на перекрывающихся участках для кернов Shira-I-21 и Shira-II-21 (рис. 2). В частности, пики фиксируются на глубинах 0–10 и 80–100 см, а зоны с нулевым содержанием окенона – на участках 45–80 и 100–120 см. Ранее было показано, что максимумы содержания окенона в донных отложениях, хотя и могут совпадать с белыми слоями, чаще всего располагаются непосредственно над ними, что свидетельствует о повышении уровня воды в водоеме (Рогозин и др., 2020).

Заключение

В данной работе мы исследовали состав и распределение каротиноидов в отложениях возрастом до 5500 лет и показали, что в наиболее древних отложениях присутствуют те же каротиноиды, что и в ранее исследованных более молодых слоях. Каротиноид пурпурных серных бактерий окенон также выявлен в самых древних слоях, следовательно, сероводород присутствовал в фотиче-

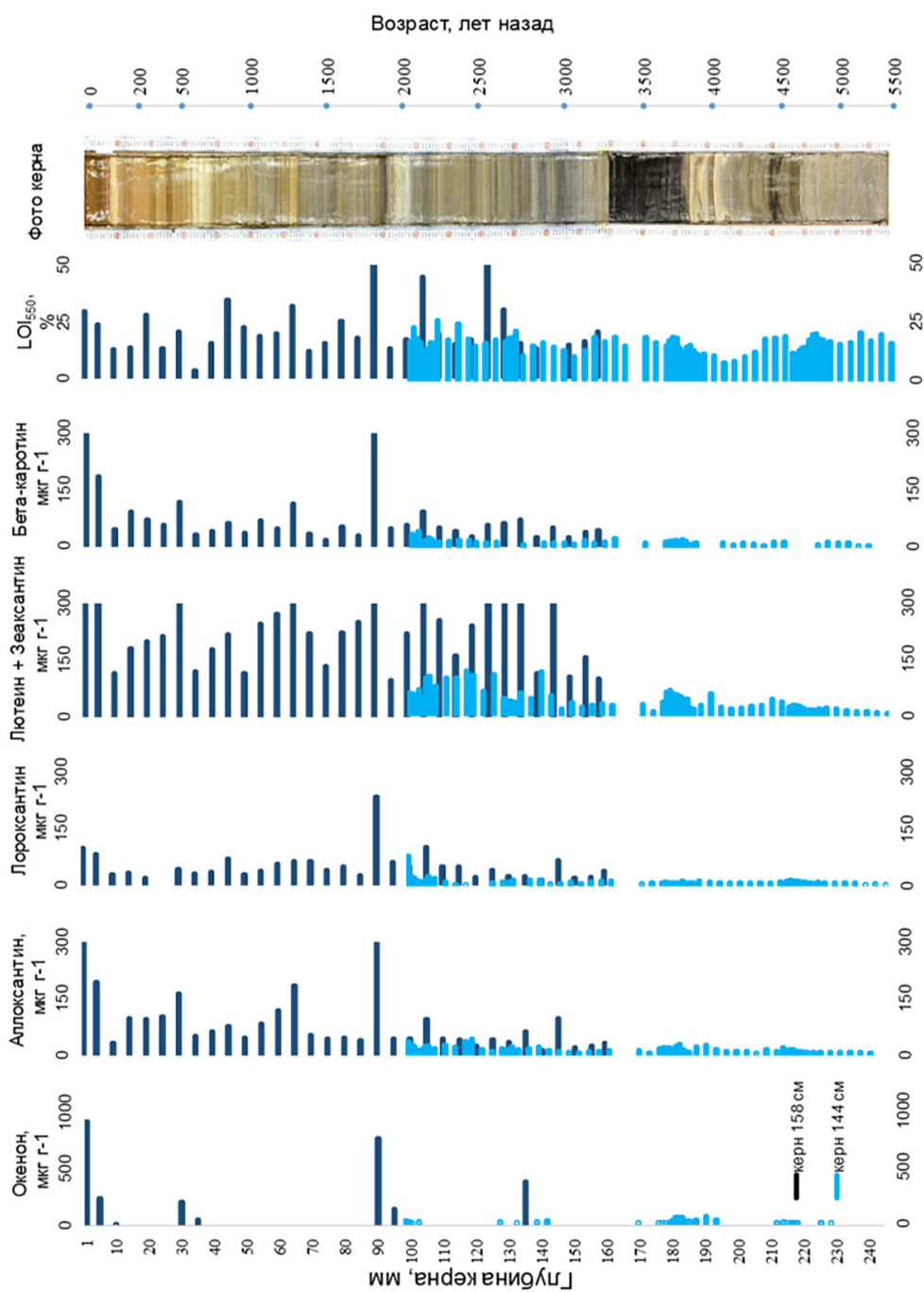


Рис. 2. Совмещённые профили распределения каротиноидов (мкг·г сух.в.⁻¹) и LOI₅₅₀ в ядрах донных отложений Шира-I-21 (158 см) и Shira-II-21 (144 см)
 Fig. 2. Carotenoids (µg·g of dry w.⁻¹) and LOI₅₅₀ in bottom sediments of Lake Shira, combined cores Shira-I-21 (158 cm) and Shira-II-21 (144 cm)

ской зоне озера около 5500 лет назад. Пики концентрации окенона коррелируют с аналогичными пиками оксигенных каротиноидов, что свидетельствует о положительном воздействии стабильной аноксигенной зоны на консервацию пигментов в отложениях. Сопоставление профилей окенона в керне молодых отложений с динамикой уровня воды за последние сто лет подтверждает гипотезу

о том, что повышенное содержание окенона отражает периоды подъема уровня воды, тогда как низкое содержание окенона или его отсутствие соответствует периодам снижения уровня либо его длительной стабилизации. Выявленные закономерности будут полезны для реконструкции уровня воды, а следовательно, влажности палеоклимата на территории юга Сибири.

Список литературы / References

Бархатов Ю.В., Зыков В.В., Хромечек Е.Б., Прокопкин И.Г., Рогозин Д.Ю. (2021) Каротиноид аллоксантин как индикатор трофической связи зоопланктона с криптофитовыми водорослями в озере Шира. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 14(2): 154–167 [Barkhatov Y. V., Zykov V. V., Khromechek E. B., Prokopkin I. G., Rogozin D. Y. (2021) Measuring alloxanthin as a proxy approach in a study of trophic relationships between zooplankton and cryptophyte algae in Lake Shira. *Journal of Siberian Federal University. Biology* [Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Biologiya], 14(2): 154–167 (in Russian)]

Безрукова Е.В., Решетова С.А., Кулагина Н.В., Щетников А.А., Филинов И.А., Кузьмин М.И. (2024) Растительность и климат на севере Минусинской котловины в позднем голоцене с декадным разрешением: запись из озера Шира. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 518(2): 359–365 [Bezrukova E. V., Reshetova S. A., Kulagina N. V., Shchetnikov A. A., Filinov I. A., Kuzmin M. I. (2024) Vegetation and climate in the north of the Minusinsk Basin in the Late Holocene: A record from Shira Lake resolved by decade. *Doklady Earth Sciences*, 518(2): 1755–1760]

Болобанщикова Г.Н., Рогозин Д.Ю., Фирсова А.Д., Родионова Е.В., Дегерменджи Н.Н., Шабанов А.В. (2015) Анализ диатомовых водорослей водной толщи и донных отложений озера Шира (Хакасия, Россия). *Сибирский экологический журнал*, 22(2): 215–228 [Bolobanschikova G. N., Rogozin D. Y., Firsova A. D., Rodionova E. V., Degermendzhy N. N., Shabanov A. V. (2015) Analysis of diatom algae from the water column and bottom sediments of Shira Lake (Khakassia, Russia). *Contemporary Problems of Ecology*, 8(2): 173–185]

Вершинин К.Е., Рогозин Д.Ю. (2014) 1300-летняя динамика растительного покрова котловины озера Шира (Сибирь, Хакасия), реконструированная по донным отложениям. *Доклады Академии наук*, 457(6): 732–735 [Vershinin K. E., Rogozin D. Y. (2014) The 1300-year dynamics of vegetation cover in the Lake Shira depression (Khakassia, Siberia, Russia) reconstructed on the basis of bottom sediments. *Doklady Biological Sciences*, 457(1): 248–251]

Зыков В.В., Рогозин Д.Ю., Калугин И.А., Дарьин А.В., Дегерменджи А.Г. (2012) Каротиноиды в донных отложениях озера Шира как палеоиндикатор для реконструкции состояния озера (Россия, Хакасия). *Сибирский экологический журнал*, 19(4): 585–595 [Zykov V. V., Rogozin D. Y., Kalugin I. A., Dar'in A. V., Degermendzhi A. G. (2012) Carotenoids in bottom sediments of lake Shira as a paleoindicator for reconstruction of lake states in Khakassiya, Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 5(4): 434–442]

Рогозин Д. Ю., Зыков В. В., Калугин И. А., Дарьин А. В., Дегерменджи А. Г. (2011) Каротиноиды фототрофных организмов в донных отложениях меромиктического озера Шира (Россия, Сибирь) как индикатор стратификации озера в прошлом. *Доклады Академии наук*, 439(2): 282–285 [Rogozin D. Y., Zykov V. V., Kalugin I. A., Daryin A. V., Degermendzhy A. G. (2011) Carotenoids of phototrophic organisms in bottom sediments of meromictic Lake Shira (Siberia, Russia) as an indicator of past stratification. *Doklady Biological Sciences*, 439(1): 228–231]

Рогозин Д. Ю., Зыков В. В., Иванова Е. А., Ануфриева Т. Н., Бархатов Ю. В., Хромечек Е. Б., Ботвич И. Ю. (2018) Меромиктический режим и сезонная динамика вертикальной структуры озера Учум (Южная Сибирь). *Сибирский экологический журнал*, 25(2): 225–238 [Rogozin D. Y., Zykov V. V., Ivanova E. A., Anufrieva T. N., Barkhatov Y. V., Khromechek E. B., Botvich I. Y. (2018) Meromixis and seasonal dynamics of vertical structure of Lake Uchum (South Siberia). *Contemporary Problems of Ecology*, 11(2): 195–206]

Рогозин Д. Ю., Зыков В. В., Бульхин А. О., Дегерменджи А. Г. (2020) Окенон в донных отложениях как палеоиндикатор изменений уровня соленого стратифицированного озера. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 493(1): 98–102 [Rogozin D. Y., Zykov V. V., Bulkhin A. O., Degermendzhi A. G. (2020) Okenone in bottom sediments as a proxy for changes in the water level of a saline stratified lake. *Doklady Earth Sciences*, 493(1): 565–568]

Babushkina E. A., Belokopytova L. V., Grachev A. M., Meko D. M., Vaganov E. A. (2017) Variation of the hydrological regime of Bele-Shira closed basin in Southern Siberia and its reflection in the radial growth of *Larix sibirica*. *Regional Environmental Change*, 17(6): 1725–1737

Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I. A., Dar'in A. V., Wagner M., Rogozin D. Y., Tarasov P. E. (2015) Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 426: 75–84

Kalugin I., Darin A., Rogozin D., Tretyakov G. (2013) Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quaternary International*, 290–291: 245–252

Last W. M., Ginn F. M. (2005) Saline systems of the Great Plains of western Canada: an overview of the limnogeology and paleolimnology. *Saline Systems*, 1(1): 10

Leavitt P. R., Hodgson D. A. (2001) Sedimentary pigments. *Tracking environmental change using lake sediments. Volume 3. Terrestrial, algal, and siliceous indicators*. Smol J. P., Birks H. J. B., Last W. M., Bradley R. S., Alverson K. (Eds.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 295–325

Mallorquí N., Arellano J. B., Borrego C. M., Garcia-Gil L. J. (2005) Signature pigments of green sulfur bacteria in lower Pleistocene deposits from the Banyoles lacustrine area (Spain). *Journal of Paleolimnology*, 34(2): 271–280

Rogozin D. Y., Genova S. N., Gulati R. D., Degermendzhy A. G. (2010) Some generalizations based on stratification and vertical mixing in meromictic Lake Shira, Russia, in the period 2002–2009. *Aquatic Ecology*, 44(3): 485–496

Rogozin D. Y., Tarnovsky M. O., Belolipetskii V. M., Zykov V. V., Zadereev E. S., Tolomeev A. P., Drobotov A. V., Barkhatov Y. V., Gaevsky N. A., Gorbaneva T. B., Kolmakova A. A., Degermendzhi A. G. (2017) Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): possible reasons and ecosystem response. *Limnologia*, 66: 12–23

Rogozin D.Y., Darin A.V., Zykov V.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Bulkin A.O., Kolmakova A.A. (2023) Seasonal and inter-annual sedimentation in meromictic Lake Shira (Siberia, Russia) during disturbance of meromixis. *Journal of Paleolimnology*, 69(4): 359–380

Wright S.W., Jeffrey S.W., Mantoura R.F. C., Llewellyn C.A., Bjørnland T., Repeta D., Welschmeyer N. (1991) Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 77: 183–196

Zykov V.V., Rogozin D.Y. (2024) Okenone and other fossil photopigments from the bottom sediments of Lake Shira, as a proxy of recent changes in the hydrological regime of the lake. *Limnology and Freshwater Biology*, 4: 747–752

EDN: BOCVWY

УДК 550.47(285.2)(470.55)

Diatom Assemblages in Lake Turgoyak Sediments: The Lake Ecosystem's Response to Holocene Climate Change

Anna V. Maslennikova*

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy
and Geoecology UrB RAS
Miass, Russian Federation*

Received 31.03.2025, received in revised form 17.07.2025, accepted 28.08.2025

Abstract. Changes in the ecosystem of the deep oligotrophic Lake Turgoyak located on the eastern slope of the Southern Urals may be associated with both anthropogenic impacts and natural processes. To identify natural variability of lake ecosystem parameters, as well as factors and mechanisms influencing the ecosystem's development, paleolimnological research was carried out. The study aimed to determine the response of Lake Turgoyak to the climate change that occurred from the end of the Late Glacial period to the present based on diatom analysis of a sediment core. The study of diatom assemblages allowed us to identify major stages of lake development. Approximately 12,500–11,000 cal BP, Lake Turgoyak was slightly brackish with a well-developed macrophyte belt. The lake's water salinity significantly decreased around 11,000 cal BP. The duration of summer stratification increased between 7,800 and 2,500 cal BP. A rise in the lake water level and a decrease in water pH occurred around 2,500 cal BP. A differential response of the lake's ecosystem to the periods of Holocene climate warming was established. For example, the climate change at the beginning of the Holocene led to increased water salinity and decreased saprobity due to the influence of macrophytes. The current climate change, similar to the Atlantic warming period, was characterized by an extended summer stratification period followed by nutrient depletion in the epilimnion. Changes in diatom assemblages in the period of antropogenic impact did not conform to the natural variability of the lake's ecosystem. Despite the lake's saprobity decreasing since the mid-20th century, this period marked the first-ever throughout its history appearance of alpha-mesosaprobies in the diatom assemblages. Additionally, the Shannon diversity index reached its maximum values.

Keywords: diatom assemblages, Holocene, climate change, paleolimnological record, lake, Urals, human impact.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: adenophora@inbox.ru

ORCID: 0000-0003-0434-4372 (Maslennikova A.)

Acknowledgements. The authors thank Valery Nikolaevich Udachin (SU FRC MG UB RAS) and Vladimir Vladislavovich Deryagin (CSPU) for collecting the lake sediment core.

Citation: Maslennikova A. V. Diatom assemblages in Lake Turgoyak sediments: The lake ecosystem's response to Holocene climate change. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 327–346. EDN: BOCVWY



Диатомовые комплексы донных отложений озера Тургойак: ответ озерной экосистемы на изменения климата в голоцене

А. В. Масленникова

*Южно-Уральский федеральный научный центр
минералогии и геоэкологии УрО РАН
Российская Федерация, Миасс*

Аннотация. Изменения экосистемы глубокого олиготрофного озера Тургойак, расположенного на восточном макросклоне Южного Урала, могут быть связаны не только с антропогенным воздействием, но и с естественными процессами. Выявление естественной вариации параметров озерной экосистемы, факторов и механизмов их воздействия на озеро возможно с помощью изучения истории озера в течение длительного периода времени. Поэтому целью нашей работы было определение реакции экосистемы озера Тургойак на изменения климата с конца позднеледникового до настоящего времени на основе диатомового анализа колонки донных отложений. В результате изучения диатомовых комплексов определены стадии развития озера, связанные с изменениями климата голоцена. Установлено, что ~12,5–11,0 тысяч калиброванных лет назад (тыс. кал.л.н.) оз. Тургойак было слабо солоноватым с хорошо развитым поясом макрофитов. Сделаны выводы об опреснении озера ~ 11,0 тыс. кал.л.н., увеличении продолжительности летней стратификации 7,8–2,5 тыс. кал.л.н., повышении уровня воды озера и снижении pH воды ~ 2,5 тыс. кал.л.н. Установлена различная реакция озерной экосистемы на потепление климата в голоцене. Так, изменение климата начала голоцена привело к возрастанию минерализации воды и уменьшению сапробности озера из-за влияния макрофитов. Современное изменение климата, так же как и потепление атлантического периода, характеризовалось увеличением периода летней стратификации с последующим обеднением эпилимниона биогенными элементами. Определено, что изменения диатомовых комплексов в период антропогенного воздействия не укладывались в естественную вариацию озерной экосистемы. Так, несмотря на то, что начиная с середины XX века сапробность озера уменьшалась, в диатомовых комплексах в этот период впервые за всю его историю появились альфа-мезосапробионты, а индекс разнообразия Шеннона достиг максимальных значений.

Ключевые слова: диатомовые комплексы, голоцен, изменение климата, палеолимнологическая реконструкция, озеро, Урал, антропогенное воздействие.

Благодарности. Автор выражает благодарность Валерию Николаевичу Удачину (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН) и Владимиру Владиславовичу Дерягину (ЮУрГГПУ) за отбор колонки донных отложений.

Цитирование: Масленникова А.В. Диатомовые комплексы донных отложений озера Тургойак: ответ озерной экосистемы на изменения климата в голоцене / А.В. Масленникова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 327–346. EDN: BOCVWY

Введение

Исследование озер, которые являются источниками питьевой воды и обладают значительным рекреационным потенциалом, имеет не только научную, но и практическую значимость, особенно в условиях дефицита водных ресурсов. К таким водоемам относится оз. Тургойак, которое является одним из самых глубоких и прозрачных горных озер на Южном Урале (Андреева, 1973). В настоящее время оз. Тургойак подвергается существенной и разнообразной антропогенной нагрузке, связанной не только с интенсивным водозабором для питьевого и технического водоснабжения г. Миасса, но и с возросшей рекреационной активностью и продолжающейся застройкой берегов озера. Усиление антропогенного воздействия, наряду с изменениями климата, может привести к необратимым последствиям для озерной экосистемы. Данные многолетних исследований, проводимых с 1937 года, позволили выявить возрастание минерализации воды озера (Балабанова, 1964; Гаврилкина и др., 1998; Захаров, 2020), повышение трофического статуса и сапробности озера (Гаврилкина и др., 1998; Рогозин, 1998; Рогозин и др., 2004; Снит'ко, 2010; Захаров, 2020). Тем не менее вопрос о причинах неблагоприятных изменений экосистемы оз. Тургойак до сих пор остается дискуссионным. Так, рядом исследователей сделан вывод о том, что эвтрофирование экосистемы связано со снижением уровня воды озера Тургойак из-за водозабора и антропогенного поступления биогенных

веществ (Гаврилкина и др., 1998). С другой стороны, мониторинговые исследования фитопланктона позволили установить возрастание количества и разнообразия сине-зеленых водорослей именно в многоводный период (1998–2008 гг.) (Снит'ко, 2010) и уменьшение биомассы фитопланктона до олиготрофного состояния в 2010 году, после снижения уровня воды озера (Snit'ko, Snit'ko, 2014).

В связи с тем что большая часть научных работ сфокусирована на определении антропогенного воздействия на озеро, к настоящему моменту очень слабо изучено влияние на экосистему климатического фактора. Палеолимнологические исследования верхней части колонки донных отложений оз. Тургойак дали возможность определить, что наиболее резкие перестройки экосистемы за период более 300 лет произошли с середины XX века после строительства плотины и начала интенсивного водозабора (Maslennikova et al., 2023). Однако реакция озера на изменения климата в период до антропогенного воздействия и естественная вариация параметров озерной экосистемы остаются неизвестными. Выявление сходства и различия ответа озера на потепления и похолодания климата за более чем 12 тысяч лет позволит оценить естественную вариацию параметров экосистемы, определить масштаб и механизм изменений, происходящих в настоящее время. Поэтому целью нашего исследования является определение реакции экосистемы озера Тургойак на изменения климата с конца позднеледниковья

до настоящего времени на основе диатомового анализа колонки донных отложений.

Методы

Колонка донных отложений (55°16'81.70" с.ш. 60°05'48.10" в.д.) мощностью 265 см (Tur1–65) была отобрана в оз. Тургойак с глубины 19 м (рис. 1). Интервал пробоотбора в зависимости от литологии варьировал от 1 до 5 см. Данные по хронологическим исследованиям, выполненным с помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS ^{14}C) и анализа профиля активности ^{210}Pb , опубликованы в предыдущих статьях (Масленникова и др., 2018; Maslennikova et al., 2023).

Для диатомового анализа образцы 0,2–0,4 г сухого веса обрабатывались смесью азотной и хлорной кислот (50:50) для удаления органического вещества (Калмыч-

ков и др., 2005). На световом микроскопе Микмед-6 вар. 7 при увеличении в 1000 раз подсчитано не менее 300 створок диатомей в каждом препарате (за исключением образца в основании колонки с очень низким количеством и разнообразием диатомей). Для более подробного исследования морфологии диатомей использована сканирующая электронная микроскопия (TE SCAN VEGA3). Идентификация видов проводилась с помощью современных определителей (Куликовский и др., 2016; Lange-Bertalot et al., 2017).

Экологические группы по отношению к pH и трофности выделены по Van Dam et al. (1994). Разделение на группы по отношению к фактору солености проводилось на основе данных Van Dam et al. (1994), модифицированных и дополненных Mertens et al. (2025). Для некоторых часто встречающихся и (или)

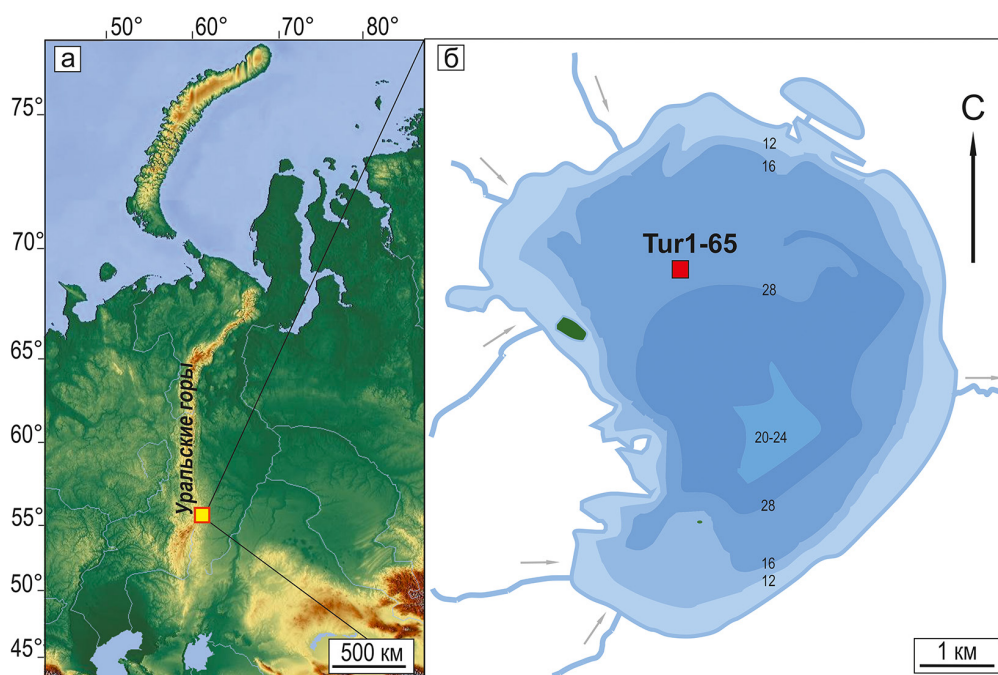


Рис. 1. Расположение оз. Тургойак (а). Упрощенная схема глубин оз. Тургойак (на основе данных В.Н. Сементовского (1916)) и место отбора колонки донных отложений Tur1–65 (б)

Fig. 1. Lake Turgoyak location (a). A simplified Lake Turgoyak bathymetry by V.N. Sementovskii (1916) and the sediment core (Tur1–65) sampling point (б)

наиболее обильных видов диатомей информация об отношении к трофическому статусу водоемов отсутствовала. Такие виды были включены в индикаторные группы, исходя из анализа литературы (Барина и др., 2019) и оптимумов общего фосфора, рассчитанных на основе данных диатомового анализа 90 озер Урала (Maslennikova, 2023). Так, *Amphora pediculus* (Kützing) Grunow 1875 и *Staurosirella lapponica* (Grunow) D.M. Williams & Round 1987 включены в группу мезотрофных диатомей, *Cocconeis neothumensis* Krammer 1990 отнесен к мезо-эвтрофным видам, а *Mastogloia elliptica* (C. Agardh) Cleve 1893 включена в группу эвтрофных диатомей. Расчет процентного вклада различных групп по галобности и отношению к рН выполнен с использованием программы Omnidia v. 6.1.4 (Lecointe et al., 1993). Для оценки изменений сапробности озера вычислен индекс сапробности Пантле-Букка в модификации Сладечека (Sládeček, 1973). Данные для расчета индивидуальных индексов сапробности взяты в литературных источниках (Барина и др., 2006, 2019). Для некоторых видов значения индивидуальных индексов сильно отличаются. Так, в одном источнике (Барина и др., 2006) *Ellerbeckia arenaria* (D. Moore ex Ralfs) Dorofeyuk & Kulikovskiy 2012 отнесена к олиго-альфа-мезосапробионтам, а в другом (Барина и др., 2019) к олигоксеносапробионтам. *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round 1988 относится в разных работах к различным группам сапробности: от ксеноолигосапробионтов (Барина и др., 2006), олигосапробионтов (Denys, 1991; Van Dam et al., 1994; Барина и др., 2019) до бета-мезосапробионтов (Hofmann, 1994; Barinova et al., 2023). *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D. Möller 1879 относят к олигосапробионтам (Барина и др., 2019; Barinova et al., 2024)

или к бета-мезосапробионтам (Denys, 1991; Van Dam et al., 1994; Барина и др., 2006). Поэтому для этих видов были вычислены средние индивидуальные индексы сапробности. Разнообразие оценивали на основе расчета индекса Шеннона, выравненность определяли на основе индекса Шеннона как отношение наблюдаемого разнообразия к максимальному (Shannon, 1948).

Диатомовые зоны выделены в программе Tilia (Grimm, 1991) с помощью разновидности кластерного анализа, использующейся для определения границ стратиграфических зон (Stratigraphically constrained cluster analysis). Для построения диаграммы экологических групп диатомовых водорослей также использована программа Tilia (Grimm, 1991). Стратиграфическая диаграмма видов диатомовых водорослей создана в программе C2 (Juggins, 2007).

Общая характеристика озера Тургойак

Оз. Тургойак является проточным димиктическим горным (320 м над ур.м.) озером тектонического происхождения, с площадью водного зеркала – 26,4 км², средней глубиной – 19,1 м и максимальной глубиной – 32,5 м (Андреева, 1973). Согласно исследованиям термического режима озера в 1996–1997 гг., нарушение весенней гомотермии и процесс установления прямой стратификации начинается уже в июне. В течение лета и в начале осени мощность эпилимниона возрастает до 12 м. Разрушение прямой стратификации начинается в сентябре и заканчивается к началу второй декады октября (Гаврилкина и др., 1998; Рогозин, Ткачев, 1998). В настоящее время озеро является пресноводным. Согласно нашим данным за 2021 год, электропроводность оз. Тургойак варьировала от 121 до 132 мкСм/см, а минерализация составляла 125–140 мг/дм³. В точке отбора колонки

прозрачность по диску Секки с мая по октябрь изменялась незначительно (10–10,5 м). По прозрачности в данной точке озеро имело олиготрофный статус (Оксиук и др., 1993). По содержанию общего азота (0,34–0,36 мг/дм³) оз. Тургойак было олиго-мезотрофным. По содержанию общего фосфора (ТР) в поверхностной воде (3,3–15 мкг/дм³) озеро было олиготрофным в августе и олиго-мезотрофным в начале мая и в конце сентября. Минимальное содержание фосфора отмечалось летом в поверхностном слое воды (3,3 мкг/дм³), а максимальная концентрация ТР выявлена летом в придонном слое воды (29 мкг/дм³). Значения перманганатной окисляемости (2,6–2,7 мгО/дм³) поверхностной воды соответствуют олиго-сапробной зоне самоочищения (бета-олигосапробный разряд, второй класс качества воды «очень чистая»).

Результаты

В результате изучения колонки донных отложений оз. Тургойак найдено 139 видов и разновидностей диатомовых водорослей, принадлежащих к 62 родам. Наибольшее количество видов и разновидностей представлено в следующих родах: *Amphora* (9), *Cocconeis* (9), *Epithemia* (6), *Navicula* (6), *Pseudostaurosira* (5), *Sellaphora* (5). К доминантам в разные периоды развития озера относились *Amphora pediculus*, *Cocconeis neothumensis*, *Ellerbeckia arenaria*, *Epithemia frickei* Krammer 1987, *Gomphonema angustum* C. Agardh 1831, *Karayevia clevei* (Grunow) Bukhtiyarova 1999, *Mastogloia elliptica*, *Pseudostaurosira brevistriata*, *Pseudostaurosira pseudoconstruens* Krammer 1990, *Staurosira venter*, *Staurosirella lapponica*. Планктонные диатомеи характеризуются наименьшей долей участия в диатомовых комплексах (рис. 2). Соотношение между бентосными, планктонными и планктонно-бентосными видами варьирует в различные

периоды развития озера. По отношению к pH доминируют алкалифилы. По отношению к фактору солености наибольшего обилия достигают солоноводно-пресноводные виды (характерны для водоемов с минерализацией 0,2–0,9 г/л). Обилие индикаторов трофического статуса сильно меняется на разных этапах развития озера. Индексы разнообразия и выравненности варьируют соответственно от 0,6 до 3,4 и от 0,2 до 0,8, достигая максимальных значений в верхней части колонки донных отложений. Значение индекса сапробности меняется от 1,0 до 1,5, что соответствует олигосапробной зоне, классу качества воды «чистая» (Sládeček, 1973; Баринова и др., 2019). С помощью кластерного анализа выделено четыре основные диатомовые зоны и девять подзон (рис. 3, 4).

DZ I (12,5–11,0 тысяч калиброванных лет назад (тыс. кал.л.н.), 265–218 см). Доминирует *Pseudostaurosira brevistriata* (до 83 %) и *Gomphonema angustum* (до 54 %). Процент солоноватоводных видов (до 19 %) и пресноводно-солоноватоводных видов (до 7 %) максимальный. Среди солоноватоводных видов (минерализация 1,8–9 г/л) доминирует *Mastogloia elliptica*. Другие солоноватоводные виды (*Tryblionella apiculata* W. Gregory 1857, *Tabularia fasciculata* (C. Agardh) D.M. Williams & Round 1986, *Ctenophora pulchella* (Kützinger) D.M. Williams & Round 1986) встречались единично. Среди пресноводно-солоноватоводных видов (минерализация 0,9–1,8 г/л) наибольшее количество створок было отмечено для *Mastogloia lacustris* (Grunow) Grunow in Van Heurck 1880 (до 7 %). Содержание каждого из других пресноводно-солоноватоводных видов (*Anomoeoneis sphaerophora* Pfitzer 1871, *Halumphora veneta* (Kützinger) Levkov 2009, *Cyclotella meneghiniana* Kützinger 1844, *Cymatopleura elliptica* W. Smith 1851) не превышало 1 %.

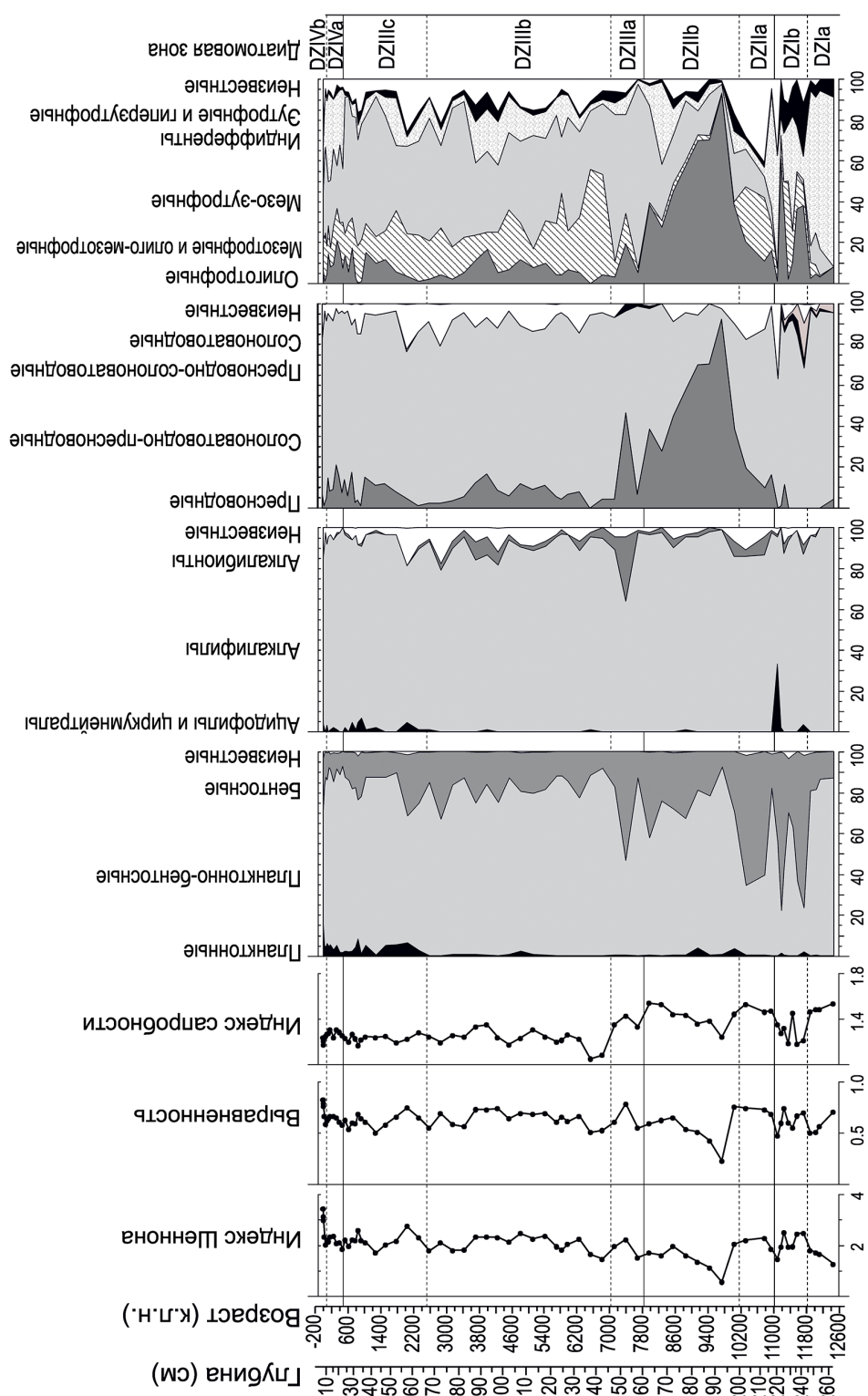


Рис. 2. Изменения индексов разнообразия, выравненности и сапробности, вариации обилия (%) экологических групп диатомовых водорослей

Fig. 2. Changes in diversity, evenness and saprobity indices and the proportions (%) of ecological groups of diatoms

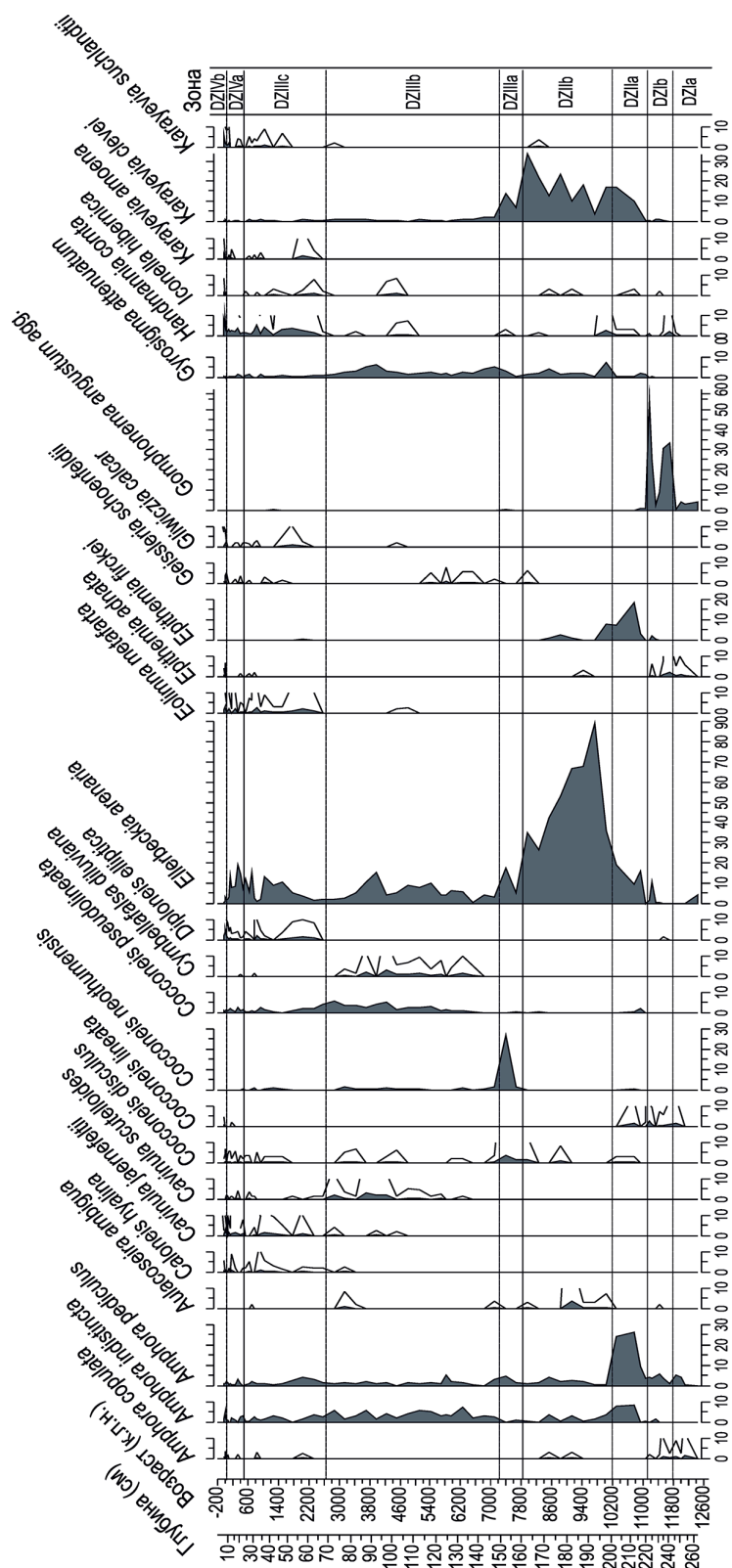


Рис. 3. Диатомовая стратиграфия донных отложений оз. Тургой (первая часть)

Fig. 3. Diatom stratigraphy of Lake Turgoyak sediments (first part)

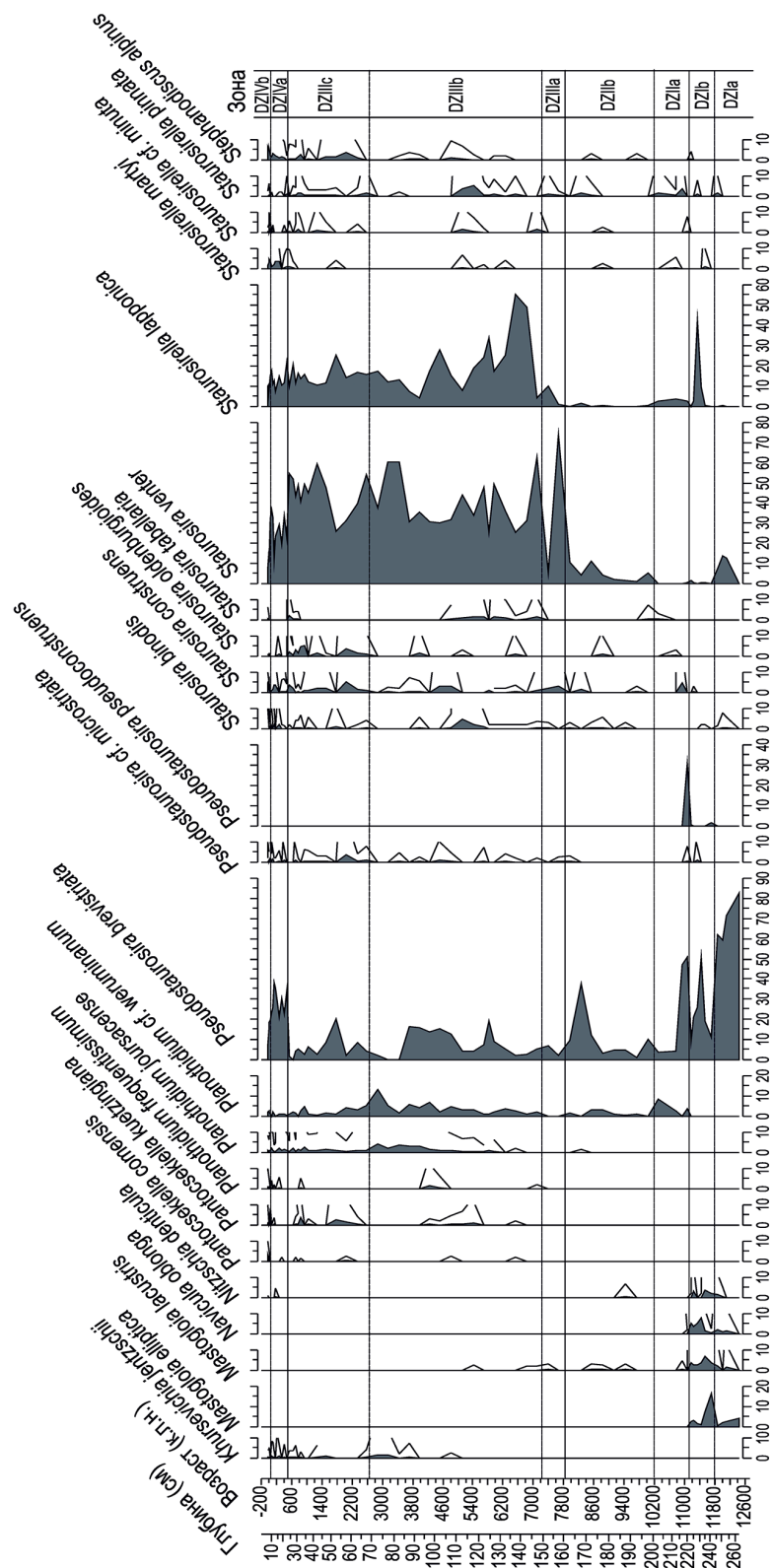


Рис. 4. Диатомовая стратиграфия донных отложений оз. Тургойак (вторая часть)

Fig. 4. Diatom stratigraphy of Lake Turgoyak sediments (second part)

DZ Ia (12,5–11,8 тыс. кал.л.н., 265–244 см) характеризуется абсолютным доминированием *Pseudostaurosira brevistriata* (59–83 %). В небольшом количестве встречается *Staurosira venter* и *S. binodis* (Ehrenberg) Lange-Bertalot 2011, а также виды, предпочитающие водоемы с повышенной минерализацией (*Mastogloia elliptica*, *Navicula oblonga* (Kützinger) Kützinger 1844, *Rhoicosphenia abbreviata* (C. Agardh) Lange-Bertalot 1980), и диатомовые водоросли, в большом количестве встречающиеся в неглубоких, заросших ризогидрофитами алкальных водоемах Урала (*Mastogloia lacustris*, *Nitzschia denticula* Grunow 1880). Данная подзона соответствует глине с остатками макрофитов (12,5–12,1 тыс. кал.л.н., 265–253 см) и черному торфянистому сапропелю с раковинами (12,1–11,8 тыс. кал.л.н., 253–244 см) (Масленникова и др., 2018).

DZ Ib (11,8–11,0 тыс. кал.л.н., 244–218 см) отличается возрастанием разнообразия диатомей, уменьшением доли створок *Pseudostaurosira brevistriata* (9–51 %) и увеличением роли *Gomphonema angustum* (до 54 %), *Navicula oblonga* (до 8 %), *Mastogloia lacustris* (до 7 %), *Nitzschia denticula* (до 4 %). Процентное содержание солоноватоводной *Mastogloia elliptica* достигает максимального значения в самом начале голоцена (11,8–11,5 тыс. кал.л.н.). Около 11,5–11,4 тыс. кал.л.н. процент *Pseudostaurosira brevistriata* повышается, а 11,4–11,3 тыс. кал.л.н. возрастает участие *Staurosirella lapponica* (до 42 %). Индекс сапробности уменьшается в сравнении с предыдущей зоной (рис. 2). Границы подзоны частично совпадают с границами горизонта контрастно слоистого сапропеля с высоким содержанием карбонатов (11,8–11,2 тыс. кал.л.н., 244–222 см) (Масленникова и др., 2018).

DZ II (11,0–7,8 тыс. кал.л.н., 218–160 см) отличается возрастанием роли *Ellerbeckia*

arenaria (10–89 %) и *Karayevia clevei* (4–33 %), исчезновением солоноватоводных и пресноводно-солоноватоводных видов (за исключением *Mastogloia lacustris*). Зона делится на две подзоны.

DZ IIa (11,0–10,2 тыс. кал.л.н., 218–200 см) характеризуется возросшей долей *Amphora pediculus* (до 26 %). Наряду с *Ellerbeckia arenaria* и *Karayevia clevei* часто встречаются *Epithemia frickei* (до 18 %) и *Amphora indistincta* Levkov 2009 (до 8 %). Границы подзоны частично совпадают с границами горизонта слоистого сапропеля с чередованием торфянистых и серых минерализованных слоев (11,2–10,3 тыс. кал.л.н., 222–205 см) (Масленникова и др., 2018).

DZ IIb (10,2–7,8 тыс. кал.л.н., 200–160 см) отличается значительным увеличением роли пресноводных (характерны для водоемов с минерализацией <0,2 г/л) и олиготрофных диатомей за счет *Ellerbeckia arenaria*. Субдоминантом является мезо-эвтрофный вид *Karayevia clevei*. Индексы разнообразия и выровненности снижаются особенно сильно, примерно 9,8–9,6 тыс. кал.л.н. Индекс сапробности варьирует от минимальных значений 9,8–9,6 тыс. кал.л.н. (1,2) до максимальных величин 8,3–8,0 тыс. кал.л.н. (1,5). Около 8,3–8,1 тыс. кал.л.н. вновь резко возрастает обилие *Pseudostaurosira brevistriata* (до 38 %). Границы подзоны частично совпадают с границами горизонта серого минерогенного сапропеля (10,3–8,1 тыс. кал.л.н., 205–165 см) (Масленникова и др., 2018).

DZ III (7,8–0,5 тыс. кал.л.н., 160–24 см) характеризуется возрастанием доли участия *Staurosira venter* (до 74 %). Преобладают мезо-эвтрофные, мезо-олиготрофные и мезотрофные диатомеи. Данная и последующая (DZ IV) зоны соответствуют буровато-оливковому сапропелю с высоким содержанием органического вещества (8,1–64 тыс. кал.л.н., 165–

0 см) (Масленникова и др., 2018). Зона DZ III включает три подзоны.

DZ IIIa (7,8–7,0 тыс. кал.л.н., 160–145 см) является переходной зоной и характеризуется колебанием содержаний *Staurosira venter* (5–74 %), *Ellerbeckia arenaria* (3–17 %), *Karayevia clevei* (2–14 %), *Cocconeis neothumensis* (1–27 %) и возрастанием количества *Cocconeis disculus* (Schumann) Cleve in Cleve & Jentzsch 1882 (до 4 %).

DZ IIIb (7,0–2,5 тыс. кал.л.н., 145–65 см) отличается доминированием *Staurosira venter* (до 63 %) и *Staurosirella lapponica* (до 55 %), возрастанием роли *Cocconeis pseudolineata* (Geitler) Lange-Bertalot 2004, *Cymbellafalsa diluviana* (Krasske) Lange-Bertalot & Metzeltin 2009, *Planothidium joursacense* (Héribaude) Lange-Bertalot 1999, *Amphora indistincta* и *Cavinula scutelloides* (W. Smith ex W. Gregory) Lange-Bertalot 1996. Индекс сапробности уменьшается, особенно резко ~6,9–6,4 тыс. кал.л.н.

DZ IIIc (2,5–0,5 тыс. кал.л.н., 65–24 см) отличается возрастанием обилия планктонных диатомей за счет *Handmannia comta* (Ehrenberg) Kociolek & Khursevich emend. Genkal 2013 (1–5 %) и *Stephanodiscus alpinus* Hustedt in Huber-Pestalozzi 1942 (1–4 %). Количество ацидофилов и нейтрофилов увеличивается соответственно за счет *Cavinula jaernefeltii* (Hustedt) D. G. Mann & Stickle 1990 и *Pseudostaurosira oldenburgoides* (Lange-Bertalot) Van de Vijver & C. E. Wetzel 2024. Возрастает разнообразие и обилие видов, обычно встречающихся в олиготрофных водоемах (*Karayevia suchlandtii* (Hustedt) Bukhtiyarova 1999, *Karayevia amoena* (Hustedt) Bukhtiyarova 1999, *Gliwiczia calcar* (Cleve) Kulikovskiy, Lange-Bertalot & Witkowski 2013, *Diploneis elliptica* (Kützinger) Cleve 1894) (Lange-Bertalot et al., 2017). Постоянно встречаются *Caloneis hyalina* Hustedt 1937 и *Eolimna metafarta*

Kulikovskiy & Lange-Bertalot in Kulikovskiy & al. 2015.

DZ IV (1450–2014 гг., 24–0 см) характеризуется резким возрастанием роли *Pseudostaurosira brevistriata* (7–38 %) и уменьшением доли *Staurosira venter* (7–37 %). Диатомовая зона делится на две подзоны.

DZ IVb (1930–2014 гг., 6–0 см) отличается от DZ IVa (1450–1930 гг., 24–6 см) резким увеличением разнообразия и доли участия планктонных видов (*Handmannia comta*, *Stephanodiscus alpinus*, *Pantocsekiella comensis* (Grunow) K. T. Kiss & E. Ács 2016, *Asterionella formosa* Hassall 1850, *Fragilaria crotonensis* Kitton 1869, *Lindavia intermedia* (Manguin ex Kociolek & Reviers) Nakov, Guillory, Julius, Theriot & Alverson ex W. C. Daniels, Novis & Edlund 2016, *Lindavia bodanica* (Eulenstein ex Grunow) T. Nakov, Guillory, Julius, Theriot & Alverson 2015). Индекс разнообразия Шеннона достигает максимальных значений с середины XX века. Несмотря на общий тренд снижения индекса сапробности, впервые за всю историю озера появляются виды альфа-мезосапробионты (*Stephanodiscus hantzschii* Grunow 1880, *Stephanodiscus parvus* Stoermer & Håkansson 1984).

Обсуждение

Значительное видовое богатство (139 видов и разновидностей) диатомовых водорослей оз. Тургойак связано не только с разнообразием биотопов, но и с существенной вариацией условий формирования донных отложений в течение истории озера. В результате диатомового анализа можно выделить основные этапы развития оз. Тургойак.

1. Стадия озера с повышенной минерализацией и с меняющейся степенью зарастания гидрофитами (12,5–11,0 тыс. кал.л.н.).

Согласно данным диатомового анализа, в конце позднеледниковья (12,5–11,8 тыс.

кал.л.н.) оз. Тургойак представляло собой озеро с повышенной минерализацией воды и с глубиной меньшей, чем в настоящее время. Относительно высокая минерализация воды, низкое разнообразие диатомей и абсолютное доминирование пионерного вида *Pseudostaurosira brevistriata* объясняется достаточно холодными и сухими условиями конца позднего дриаса, отмеченными на спорово-пыльцевых диаграммах Южного Урала доминированием пыльцы трав (Maslennikova et al., 2016; Maslennikova, 2020; Нигаматзянова и др., 2023). Накопление различных типов отложений (глина и черный сапропель) (Масленникова и др., 2018) свидетельствует о том, что условия осадконакопления в течение этого периода (12,5–11,8 тыс. кал.л.н.) были нестабильны.

Около 11,8–11,5 тыс. кал.л.н. минерализация озера возрастает, одновременно увеличивается разнообразие диатомей, что является ответом на потепление климата, отмеченное в диатомовых и палинологических летописях Южного и Среднего Урала (Maslennikova et al., 2016; Maslennikova, Udachin, 2017; Maslennikova, 2022; Нигаматзянова и др., 2023). В то же время происходит уменьшение индекса сапробности, что может быть связано с увеличением обилия ризогидрофитов, которые, во-первых, используют биогенные элементы, во-вторых, выделяют кислород в процессе фотосинтеза, что способствует быстрому разложению органических веществ. Кроме того, на данной стадии активно происходит биохеомогенное карбонатонакопление (Масленникова и др., 2018), что указывает на высокий pH озера и приводит к ограничению внутреннего цикла фосфора в водоеме (Hu, Huser, 2014). Быстрая смена видов, доминирующих в диатомовых комплексах, указывает на нестабильные условия озерного осадконакопления в период 11,8–11,0 тыс. кал.л.н.

Диатомовый анализ донных отложений мелководного озера Сырыткуль, расположенного в 20 км к северо-востоку от оз. Тургойак, показал наличие стадии солоноватого водоема (электропроводность воды от 500 до 2000 мкСм/см по Stewart, Kantrud, 1971) в раннем голоцене (11,5–11,0 тыс. кал.л.н.) в фазу господства пыльцы трав (Maslennikova et al., 2016; Maslennikova, 2020). Для крупного и глубокого озера Увильды, находящегося в 45 км к северо-востоку от оз. Тургойак, выявлено большое процентное содержание (до 60 %) мезогалобов (*Anomoeoneis polygramma* (Ehrenberg) Cleve 1895, *Campylodiscus clypeus* (Ehrenberg) Ehrenberg ex Kützing 1844) в фазу господства пыльцы трав и в фазу березовых лесов (Хомутова и др., 1995). Для крупного и глубокого озера Большой Кисегач, расположенного в 20 км к юго-востоку от оз. Тургойак, отмечено присутствие видов диатомей, предпочитающих водоемы с повышенной минерализацией (*Anomoeoneis polygramma*, *Campylodiscus clypeus*, *Rhoicosphenia abbreviata*) в фазу господства пыльцы трав и до середины фазы березовых лесов (Давыдова, 1978; Хомутова, 1978). Для мелководного озера Уфимского, расположенного в 40 км к северу от оз. Тургойак, в фазу господства пыльцы трав отмечаются колебания электропроводности воды, однако озеро остается пресным (Maslennikova, 2020). Для крупного и глубокого озера Большое Миассово, находящегося в 10 км к востоку от оз. Тургойак, также не отмечается стадии солоноватого озера ни в фазу господства пыльцы трав, ни в фазу березовых лесов (Валиева и др., 2023; Нигаматзянова и др., 2023). Такие отличия истории озер могут быть связаны с комплексом локальных факторов, которые включают не только различия микроклимата, характерные для горных территорий, но и гидрологические особенности озер, состав пород

их водосборов, а также место отбора колонок донных отложений. Эти данные опровергают вывод А. П. Жузе (1939) о синхронном осолонении озер Восточного склона Урала в фазу березовых лесов и об отсутствии фазы солоноватого водоема у оз. Тургойак.

2. Стадия увеличения глубины и уменьшения минерализации озера (11,0–7,8 тыс. кал.л.н.).

Исчезновение диатомовых водорослей, имеющих сравнительно высокий оптимум минерализации, около 11,0 тыс. кал.л.н. свидетельствует об опреснении, отмеченном и в некоторых других озерах Южного Урала (Maslennikova, 2020; Масленникова и др., 2023). Значительное уменьшение количества диатомей, характерных для заросших ризогидрофитами водоемов Южного Урала, резкое возрастание содержания *Ellerbeckia arenaria*, тяготеющей к каменистому и песчаному субстрату (Забелина и др., 1951; Lange-Bertalot et al., 2017) и предпочитающей холодные воды (Барина и др., 2006), указывает на снижение роли гидрофитов 10,2–7,8 тыс. кал.л.н. Примерно в это же время (10,3 тыс. кал.л.н.) происходит смена неясно слоистого сапропеля на серый минерогенный сапропель. Согласно данным палинологического анализа озер Южного Урала, в это время (10,2 тыс. кал.л.н.) происходило уменьшение роли березовых лесов и возрастание количества сосны (Maslennikova, 2020; Нигаматзянова и др., 2023). В оз. Б. Миассово отдельная диатомовая зона в это время не выделяется (Валиева и др., 2023). Поэтому можно было бы предположить, что указанные изменения оз. Тургойак имели локальный характер. Тем не менее по времени эти изменения совпадают с резким снижением продуктивности оз. Таватуй (Средний Урал) и возрастанием количества пыльцы карликовой березы, что было интерпретировано как похолодание климата

(Maslennikova, 2022). Поэтому вопрос о факторах, вызвавших подобные сильные изменения диатомовых комплексов оз. Тургойак, требует дальнейших исследований.

Событие 8,2 тыс. кал.л.н., использованное для разделения раннего (Гренландий) и среднего (Нортгриппий) голоцена в новой схеме голоцена (Walker et al., 2019), отражается в палеолетописи оз. Тургойак только резким возрастанием содержания створок *Pseudostaurosira brevistriata* и повышением величины индекса сапробности Пантле-Букка. В целом данное событие теряется на фоне резких изменений диатомовых комплексов, которые произошли во время других климатических флуктуаций, что может быть связано как с незначительным изменением озерной экосистемы в это время, так и с недостаточным разрешением палеолетописи. Тем не менее 8,1 тыс. кал.л.н. происходит смена серого минерогенного сапропеля на буровато-оливковый сапропель с высоким содержанием органического вещества (Масленникова и др., 2018), что указывает на значительное изменение условий формирования донных отложений непосредственно после данного события.

3. Стадия увеличения периода стратификации (7,8–2,5 тыс. кал.л.н.).

Согласно данным Н. А. Хотинского с соавторами (1982), потепление атлантического периода (8000–4500 ¹⁴С л.н., ~8,9–5,1 тыс. кал.л.н.) вызвало максимальный расцвет широколиственных и хвойных лесов на Урале. На Южном Урале пыльцевые зерна широколиственных пород появляются в донных отложениях, накопленных около 8,4–8,8 тыс. кал.л.н., а отчетливое повышение кривой содержания пыльцы широколиственных пород отмечается примерно 6,9 тыс. кал.л.н. (Maslennikova, 2020; Нигаматзянова и др., 2023). Точно так же, как и в начале голоцена,

в это время происходит снижение индекса сапробности. Однако состав диатомовых комплексов сильно отличается и соответствует меньшей минерализации и большей глубине озера. Кроме того, в атлантическом периоде в оз. Тургойак накапливается не карбонатный сапропель, характерный для заросших гидрофитами водоемов, как в начале голоцена, а сапропель с повышенным содержанием органического вещества (Масленникова и др., 2018). Объяснить снижение индекса сапробности и одновременное накопление органики и фосфора в донных отложениях можно усилением роли стратификации как фактора, влияющего на поступление в воду биогенных элементов из донных отложений. Данный механизм отмечается не только в эвтрофных, но и в олиготрофных озерах (Radbourne et al., 2019; Ruka et al., 2022). Увеличение периода стратификации было связано с возрастанием продолжительности и температуры вегетационного периода (Хотинский и др., 1982).

4. Стадия повышения уровня озера и уменьшения pH из-за повышения коэффициента увлажнения территории (2,5–0,05 тыс. кал.л.н.).

Возрастание обилия планктонных диатомей около 2,5 тыс. кал.л.н. совпадает с подобными изменениями диатомовых комплексов оз. Б. Миассово (Валиева и др., 2023). Увеличение количества видов, предпочитающих мягкие и олиготрофные воды, может объясняться повышением количества осадков и притока с водосбора, заросшего хвойным лесом, вод относительно бедных катионами оснований и богатых органическими кислотами (Fritz, Anderson, 2013).

Изменения диатомовых комплексов в XV–XIX вв., выраженные в смене доминантов, совпадают по времени с Малым ледниковым периодом. Однако интерпретировать эти вариации довольно сложно из-за ши-

рокого диапазона экологической толерантности и противоречивых данных об экологических предпочтениях *Pseudostaurosira brevistriata* и *Staurosira venter*. Тем не менее на основе статистической обработки данных диатомового и гидрохимического анализа 90 озер Урала (Maslennikova, 2020, 2023) определено, что оптимум электропроводности у *Pseudostaurosira brevistriata* составляет 472 мкСм/см, а у *Staurosira venter* только 277 мкСм/см. Кроме того, отмечено, что *Pseudostaurosira brevistriata* особенно массово развивается в водоемах, заросших гидрофитами. Поэтому можно предположить небольшое возрастание минерализации и электропроводности воды и (или) увеличение площади литорали, заросшей гидрофитами в XV–XIX вв.

5. Стадия антропогенного эвтрофирования и увеличения периода летней стратификации (XX век–настоящее время).

Повышение содержания планктонных диатомей, в том числе мелких центрических *Pantocsekiella comensis*, пеннатных *Fragilaria crotonensis* и *Asterionella formosa*, может объясняться усилением продолжительности и интенсивности летней стратификации из-за потепления климата (Rühland et al., 2015). Этот вывод подтверждается исследованиями, доказавшими ускорение развития летней стратификации и более поздние сроки ледостава в оз. Тургойак из-за повышенных температур (Рогозин, Ткачев, 1998).

Уменьшение индекса сапробности Пантле-Букка, так же как и при потеплении в атлантическом периоде, может быть связано с ограничением внутреннего цикла биогенных элементов из-за стратификации. Этот вывод подтверждается исследованиями гидрохимии воды оз. Тургойак с мая по сентябрь 2021 года, показавшими минимальное содержание общего фосфора в поверхностной воде

в летний период. В то же время понижение индексов сапробности IDG и IBD, рассчитанных ранее (Maslennikova et al., 2023), указывает на возрастание органического загрязнения. Это несоответствие объясняется тем, что IBD и IDG очень сильно зависят от минерализации озера (Maslennikova, Gulakov, 2022) и их уменьшение могло отражать ее возрастание в период интенсивного антропогенного воздействия, что отмечено и при мониторинговых исследованиях оз. Тургойак (Гаврилкина и др., 1998). Максимальные значения индекса разнообразия диатомей с середины XX века, а также появление гиперэвтрофных альфа-мезосапробов свидетельствует о начале процессов эвтрофирования водоема и периодических эпизодах органического загрязнения, более ярко выраженных ближе к берегу и источникам антропогенного воздействия.

Заключение

На основе данных диатомового анализа колонки донных отложений, накопленных за 12,5 тыс. лет, выявлено пять основных стадий развития оз. Тургойак. Около 12,5–11,0 тыс. кал.л.н. озеро отличалось повышенной минерализацией и имело хорошо развитый пояс макрофитов. Примерно 11,0 тыс. кал.л.н. минерализация озерной воды сильно уменьшилась. Период с 7,8 тыс. кал.л.н. до 2,5 тыс. кал.л.н. отличался увеличением продолжительности летней стратификации

озера из-за потепления климата. Увлажнение климата около 2,5 тыс. кал.л.н. привело к увеличению уровня и небольшому закислению озера. Последняя стадия развития, начавшаяся в XX веке, включает в себя изменения озера, связанные с антропогенным эвтрофированием и современным изменением климата.

Установлено, что в течение своего развития экосистема оз. Тургойак неодинаково реагировала на потепление климата. Так, изменение климата в начале голоцена привело к возрастанию минерализации воды и уменьшению сапробности озера из-за влияния макрофитов. Современное изменение климата, так же как и потепление атлантического периода, характеризовалось увеличением продолжительности периода летней стратификации с сопутствующим обеднением эпилимниона биогенными элементами.

Определено, что изменения диатомовых комплексов с середины XX века не укладываются в естественную вариацию озерной экосистемы в ответ на климатические флуктуации. Так, несмотря на уменьшение сапробности озера, в диатомовых комплексах впервые появляются альфа-мезосапробионты, а индекс разнообразия диатомей достигает максимальных значений. Эти особенности отражают процессы эвтрофирования, вероятно, более выраженные ближе к берегу и к источникам антропогенного воздействия.

Список литературы / References

- Андреева М.А. (1973) *Озера Среднего и Южного Урала*. Челябинск, Южно-Уральское книжное издательство, 272 с. [Andreeva M. A. (1973) *Middle and Southern Urals lakes*. Chelyabinsk, Southern Urals books press, 272 p. (in Russian)]
- Балабанова З.М. (1964) Горное озеро Тургойак. *Труды УралВНИОРХ*, 6: 61–83 [Balabanova Z. M. (1964) Turgoyak, a Mountain Lake. *Proceedings of UralVNIORH* [Trudy UralVNIORH], 6: 61–83 (in Russian)]
- Барина С.С., Белоус Е.П., Царенко П.М. (2019) *Альгоиндикация водных объектов Украины: методы и перспективы*. Хайфа, Киев, Издательство университета Хайфы, 367 с.

[Barinova S. S., Bilous O. P., Tsarenko P. M. (2019) *Algal indication of water bodies in Ukraine: methods and perspectives*. Haifa, Kiev, University of Haifa Publisher, 367 p. (in Russian)]

Баринаова С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. (2006) *Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды*. Тель-Авив, Издательство "Pilies Studio", 498 с. [Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anissimova O. V., (2006) *Diversity of algal indicators in environmental assessment*. Tel-Aviv, Pilies Studio Press, 498 p. (in Russian)]

Валиева Э. А., Фролова Л. А., Палагушкина О. В., Нигматуллин Н. М., Нигаматзянова Г. Р., Нургалиев Д. К. (2023) Реконструкция истории развития озера Большое Миассово (Южный Урал) в период позднеледниковья и голоцена на основе диатомового анализа донных отложений. *Геоморфология и палеогеография*, 54(4): 195–206 [Valieva E. A., Frolova L. A., Palagushkina O. V., Nigmatullin N. M., Nigamatzyanova G. R., Nurgaliev D. K. (2023) Late Glacial and Holocene history of Lake Bolshoe Miassovo (Southern Urals) based on diatom analysis of bottom sediments. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*, 54(4): 195–206 (in Russian)]

Гаврилкина С. В., Кораблева О. Е., Митюхляев Д. В., Рогозин А. Г., Танаева Г. В., Ткачев В. А., Шиманский Л. И. (1998) *Экология озера Тургойак*. Миасс, ИГЗ УрО РАН, 154 с. [Gavrilkina S. V., Korableva O. E., Mityuhlyayev D. V., Rogozin A. G., Tanaeva G. V., Tkachev V. A., Shimanskyi L. I. (1998) *Ecology of Lake Turgoyak*. Miass, Ilmeny State Reserve UB RAS, 154 p. (in Russian)]

Давыдова Н. Н. (1978) Диатомовые водоросли в отложениях озер. *Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озер Южного Урала*. Санкт-Петербург, Наука, с. 228–237 [Davydova N. N. (1978) Diatoms in lake sediments. *A landscape factor in the formation of lake hydrology in Southern Urals*. St. Petersburg, Nauka, p. 228–239 (in Russian)]

Жузе А. П. (1939) *Палеография водоемов на основе диатомового анализа. Труды Верхневолжской экспедиции, Выпуск 4*. Ленинград, Типография им. Володарского. 86 с. [Zhuze A. P. (1939) *Paleolimnology based on diatom analysis. Proceedings of the Upper Volga Expedition, Issue 4*. Leningrad, Volodarsky Printing House, 86 p. (in Russian)]

Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. (1951) *Определитель пресноводных водорослей СССР. Диатомовые водоросли*. Москва, Советская наука, 615 с. [Zabelina M. M., Kiselev I. A., Proshkina-Lavrenko A. I., Sheshukova V. S. (1951) *Key to freshwater algae of the USSR. Diatoms*. Moscow, Sovetskaya nauka, 619 p. (in Russian)]

Захаров С. Г. (2020) Динамика экологического состояния озера Тургойак. *Известия Русского географического общества*, 152(1): 56–65 [Zakharov S. G. (2020) Dynamics of environmental status of the Lake Turgoyak. *Proceedings of the Russian Geographical Society* [Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva], 152(1): 56–65 (in Russian)]

Калмычков Г. В., Кострова С. С., Гелетий В. Ф., Ткаченко Л. Л., Рохлин В. И. (2005) Способ выделения створок диатомовых водорослей из донных осадков для определения их кислородного изотопного состава и реконструкции палеоклимата. *Геохимия*, 12: 1358–1360 [Kalmychkov G. V., Kostrova S. S., Geletii V. F., Tkachenko L. L., Rakhlin V. I. (2005) Method of separation of diatom frustules from bottom sediments for oxygen isotopic analysis and paleoclimatic reconstruction. *Geochemistry International*, 43(12): 1252–1254]

Куликовский М. С., Глущенко А. М., Генкал С. И., Кузнецова И. В. (2016) *Определитель диатомовых водорослей России*. Ярославль, Филигрань, 804 с. [Kulikovskiy M. S., Glushchenko A. M.,

Genkal S.I., Kuznetsova I.V. (2016) *Identification book of diatoms from Russia*. Yaroslavl, Filigran, 804 p. (in Russian)]

Масленникова А.В., Артемьев Д.А., Зазовская Э.П., Дерягин В.В., Гулаков В.О., Удачин Н.В., Аминов П.Г., Удачин В.Н. (2023) Геохимическая летопись озера Сабакты: количественная оценка электропроводности вод и реконструкция обстановок осадконакопления позднеледниковья и голоцена степной зоны Южного Урала. *Литосфера*, 23(3): 410–429 [Maslennikova A. V., Artemiev D. A., Zazovskaia E. P., Deryagin V. V., Gulakov V. O., Udachin N. V., Aminov P. G., Udachin V. N. (2023) Geochemical record of Lake Sabakty: Electrical conductivity and reconstruction of the Lateglacial and Holocene environments in the Southern Urals (Russia) steppe. *Lithosphere (Russia)*, 23(3): 410–429 (in Russian)]

Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В., Штенберг М.В. (2018) Реконструкция этапов развития озера Тургойак (Южный Урал) в голоцене. *Литосфера*, 18(6): 914–927 [Maslennikova A. V., Udachin V. N., Deryagin V. V., Shtenberg M. V. (2018) Reconstruction of Turgoyak Lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. *Lithosphere (Russia)*, 18(6): 914–927 (in Russian)]

Нигаматзянова Г.Р., Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М., Юсупова А.Р., Нургалиев Д.К. (2023) Реконструкция растительности и климатических изменений позднеледниковья – голоцена Южного Урала на основе спорово-пыльцевого анализа донных отложений озера Большое Миассово. *Геоморфология и палеогеография*, 54(4): 179–194 [Nigamatzyanova G. R., Frolova L. A., Nigmatullin N. M., Yusupova A. R., Nurgaliev D. K. (2023) Vegetation and climate changes in the Southern Urals in the Late Glacial and Holocene derived from pollen record of Lake Bolshoe Miassovo. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*, 54(4): 179–194 (in Russian)]

Оксиук О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г. (1993) Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. *Гидробиологический журнал*, 29(4): 62–76 [Oksiyuk O. P., Zhukinsky V. N., Braginsky L. P., Linnik P. N., Kuzmenko M. I., Klenus V. G. (1993) A comprehensive ecological classification of inland surface water quality. *Hydrobiological Journal* [Gidrobiologicheskii zhurnal], 29(4): 62–76 (in Russian)]

Рогозин А.Г. (1998) Сравнительная сапробиологическая характеристика озер Тургойак и Большое Миассово. *Известия Челябинского научного центра УрО РАН*, 1: 151–160 [Rogozin A. G. (1998) Comparative saprob characteristic of lakes Turgojak and Large Miassovo. *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center UB RAS* [Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAN], 1: 151–160 (in Russian)]

Рогозин А.Г., Гаврилкина С.В., Перескоков А.В., Снитко Л.В. (2004) Оценка экологического состояния водоемов методом картирования акваторий (на примере озер Ильменского заповедника и окрестностей г. Миасса). *Известия Челябинского научного центра УрО РАН*, 2: 151–156 [Rogozin A. G., Gavrilkina S. V., Pereskokov A. V., Snit'ko L. V. (2004) Assessment of ecological state of water bodies by mapping of water areas (with reference to lakes of Ilmensky Reserve and environs of town Miass). *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center UB RAS* [Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAN], 2: 151–156 (in Russian)]

Рогозин А.Г., Ткачев В.А. (1998) О некоторых гидрологических особенностях озера Тургойак. *Известия Челябинского научного центра УрО РАН*, 1: 131–140 [Rogozin A. G., Tkachev V. A.

(1998) About some hydrological features of Turgoyak lake. *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center UB RAS* [Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAN], 1: 131–140 (in Russian)]

Сементовский В.Н. (1916) *Тургойак: Очерк*. Казань, типография М.В. Добренкова, 60 с. [Sementovskii V.N. (1916) *An essay on Lake Turgoyak*. Kazan, M. V. Dobrenkov's Printing House, 60 p. (in Russian)]

Снитко Л.В. (2010) Фитопланктон озера Тургойак в конце многоводного гидрологического цикла. *Вестник Челябинского государственного университета*, 8: 77–81 [Snit'ko L. V. (2010) Phytoplankton of Lake Turgoyak at the end of a high-water hydrological cycle. *Bulletin of Chelyabinsk State University* [Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta], 8: 77–81 (in Russian)]

Хомутова В.И., Андреева М.А., Давыдова Н.Н., Неуструева И.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. (1995) Южный Урал. Озеро Увильды. *История озер севера Азии*. Санкт-Петербург, Наука, с. 22–40 [Khomutova V.I., Andreeva M. A., Davydova N. N., Neustrueva I. Y., Rybalko A. E., Subetto D. A. (1995) Southern Urals. Lake Uvil'dy. *A history of the lakes in Northern Asia*. St. Petersburg, Nauka, p. 22–40 (in Russian)]

Хомутова В.И. (1978) Спорово-пыльцевой анализ донных отложений. *Ландшафтный фактор в формировании гидрологии озер Южного Урала*. Санкт-Петербург, Наука, с. 222–227 [Khomutova V.I. (1978) Spore-pollen analysis of bottom sediments. *A landscape factor in the formation of lake hydrology in Southern Urals*. St. Petersburg, Nauka, p. 222–227 (in Russian)]

Хотинский Н.А., Немкова В.К., Сурова Т.Г. (1982) Главные этапы развития растительности и климата Урала в голоцене. *Археологические исследования Севера Евразии. Вопросы археологии Урала, Выпуск 16*. Стоянов В. Е. (отв. ред.) Свердловск, с. 145–153 [Khotinskyi N. A., Nemkova V. K., Surova T. G. (1982) Main stages of the Ural vegetation and climate development in the Holocene. *Archaeological research of the Eurasian North. Issues of Ural archeology, Issue 16*. Stoyanov V. E. (editor-in-chief) Sverdlovsk, p. 145–153 (in Russian)]

Barinova S., Gabyshev V., Genkal S., Gabysheva O. (2024) Diatoms' diversity in the assessment of the impact of diamond and oil and gas mining on aquatic ecosystems of the Central Yakut Plain (Eastern Siberia, Yakutia) using bioindication and statistical mapping methods. *Diversity*, 16(8): 440

Barinova S., Gabyshev V., Genkal S., Gabysheva O. (2023) Diatoms of small water bodies as bioindicators in the assessment of climatic and anthropogenic impacts on the coast of Tiksi Bay, Russian Arctic. *Water*, 15(8): 1533

Denys L. (1991) *A check-list of the diatoms in the holocene deposits of the Western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. I. Introduction, ecological code and complete list. Professional Papers of the Geological Survey of Belgium, Vol. 246*. Ministère des Affaires Economiques – Service Géologique de Belgique, 41 p.

Fritz S.C., Anderson N.J. (2013) The relative influences of climate and catchment processes on Holocene lake development in glaciated regions. *Journal of Paleolimnology*, 49(3): 349–362

Grimm E.C. (1991) Tilia 1.12, Tilia Graph 1.18. Illinois State Museum. Research and Collection Center, Springfield

Hofmann G. (1994) Aufwuchs-Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. *Bibliotheca Diatomologica*, 30: 1–241

Hu Q., Huser B.J. (2014) Anthropogenic oligotrophication via liming: Long-term phosphorus trends in acidified, limed, and neutral reference lakes in Sweden. *Ambio*, 43(Suppl 1): 104–112

Juggins S. (2007) C 2 (Version 1.5). Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation

Lange-Bertalot H., Hofmann G., Werum M., Cantonati M. (2017) *Freshwater benthic diatoms of Central Europe: over 800 common species used in ecological assessment. English edition with updated taxonomy and added species*. Schmitten-Oberreifenberg, Koeltz Botanical Books, 942 p.

Lecointe C., Coste M., Prygiel J. (1993) “Omnidia”: software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. *Hydrobiologia*, 269(1): 509–513

Maslennikova A. V. (2023) Diatom abundances, total phosphorus and electric conductivity of 90 Urals lakes [dataset bundled publication]. PANGAEA Data Publisher

Maslennikova A. (2022) Holocene environments in the Middle Urals: Palaeolimnological proxies from the Lake Tavatui (Russia). *Quaternary International*, 622: 51–64

Maslennikova A. V. (2020) Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia. *Journal of Paleolimnology*, 63(2): 129–146

Maslennikova A. V., Gulakov V. O. (2022) Application of European diatom indices for paleolimnological reconstructions of Lake Tavatui (Middle Urals, Russia) ecosystem changes. *Limnology and Freshwater Biology*, 4: 1492–1494

Maslennikova A., Udachin V., Deryagin V., Artemyev D., Filippova K., Gulakov V., Udachin N., Aminov P. (2023) Sediment records of lake eutrophication and oligotrophication under the influence of human activity and climate warming in the Urals metallurgical region (Russia). *Hydrobiologia*, 850(7): 1669–1698

Maslennikova A. V., Udachin V. N. (2017) Lakes ecosystem response to Holocene climate changes and human impact in the Southern Urals: Diatom and geochemical proxies. *The Holocene*, 27(6): 847–859

Maslennikova A. V., Udachin V. N., Aminov P. G. (2016) Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological, geochemical and diatom records from the Lake Syrytkul sediments. *Quaternary International*, 420: 65–75

Mertens A., van der Wal J., Verweij G., Pex B., van Dulmen A., van Dam H. (2025) A revised list of diatom ecological indicator values in the Netherlands. *Ecological Indicators*, 172: 113219

Radbourne A. D., Elliott J. A., Maberly S. C., Ryves D. B., Anderson N. J. (2019) The impacts of changing nutrient load and climate on a deep, eutrophic, monomictic lake. *Freshwater Biology*, 64(6): 1169–1182

Rühland K. M., Paterson A. M., Smol J. P. (2015) Lake diatom responses to warming: reviewing the evidence. *Journal of Paleolimnology*, 54(1): 1–35

Ruka A. T., Johansen J. R., Leps J., Loken Z. J., Schuler M., Mattes B., Yates E., Relyea R. A. (2022) Seasonal diatom community responses to development and climate change in Lake George, an oligotrophic lake in the Adirondack Mountains. *Hydrobiologia*, 849(12): 2761–2780

Shannon C. E. (1948) A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3): 379–423

Sládeček V. (1973) System of water quality from the biological point of view. *Archiv Für Hydrobiologie*, 7: 1–218

Snit'ko L. V., Snit'ko V. P. (2014) Phytoplankton as an indicator in assessing long-term variations in water quality of lakes Bolshoye Miassovo and Turgoyak, the South Urals. *Water Resources*, 41(2): 210–217

Stewart R. E., Kantrud H. A. (1971) *Classification of natural ponds and lakes in the glaciated prairie region*. Resource Publication 92. U. S. Fish and Wildlife Service. Washington, Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, 64 p.

Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. (1994) A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Netherland Journal of Aquatic Ecology*, 28(1): 117–133

Walker M., Head M. J., Lowe J., Berkelhammer M., Björck S., Cheng H., Cwynar L. C., Fisher D., Gkinis V., Long A., Newnham R., Rasmussen S. O., Weiss H. (2019) Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes. *Journal of Quaternary Science*, 34(3): 173–186

EDN: BRZXZS

УДК 565.31

Abiotic Factors Influencing the Formation of Recent Cladocera Community Structures in Tundra Lakes in the Pechora River Delta (Nenets Autonomous Okrug)

Niyaz M. Nigmatullin^a,
Larisa A. Frolova^{b*} and Yan T. Shneidman^c

^aKazan (Volga Region) Federal University
Kazan, Russian Federation

^bInstitute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

^cMoscow Institute of Physics and Technology
Dolgoprudny, Russian Federation

Received 24.03.2025, received in revised form 13.08.2025, accepted 12.09.2025

Abstract. Arctic freshwater ecosystems are undergoing profound transformations driven by global climate change and increasing anthropogenic impact, resulting in a major restructuring of biological systems. However, our knowledge of Arctic freshwater fauna remains fragmented and incomplete. Cladocerans, an important component of freshwater ecosystems, are recognized as effective indicators of the ecological conditions of water bodies that respond sensitively to environmental changes. In this study, we examined the influence of local abiotic factors in shaping the Cladocera community composition in surface sediments from 47 tundra lakes in the Pechora River delta (Malozemelskaya tundra). A paleolimnological approach was applied to examine the taxonomic diversity of cladocerans in these lakes. Additionally, morphometric and hydrochemical characteristics of the water bodies were obtained. Relationships between cladoceran communities and abiotic environmental parameters were analyzed using the ordination methods (redundancy analysis, RDA) and Spearman correlation analysis. Three environmental variables – mineralization, pH, and lake area – were identified as having the strongest influence on the Cladocera community structure. Also, these parameters were the most variable among the studied lakes. The abundance of *Pleuroxus uncinatus* and *Alona quadrangularis* remains showed the strongest positive correlation with mineralization, whereas the abundance of *Bosmina* (*Eubosmina*)

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: larissa.frolova@kpfu.ru

ORCID: 0000-0001-6863-8666 (Nigmatullin N.); 0000-0001-8505-0151 (Frolova L.); 0009-0009-6672-446X (Shneidman Y.)

longispina and *Alonopsis elongata* remains was negatively correlated with both mineralization and pH. The abundance of *Bosmina (Eubosmina) longispina* remains showed a significant positive correlation with the lake area, while abundance of *Chydorus cf. sphaericus* remains was negatively correlated with it. Overall, our study highlights the high potential of Cladocera as indicators in paleoecological research into northern ecosystems, which is especially relevant in the context of ongoing environmental change.

Keywords: Cladocera, Pechora River Delta, Arctic freshwater ecosystems, paleolimnological analysis.

Acknowledgements. The studies were supported by a grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 075–15–2024–554 of 24/04/2024).

Citation: Nigmatullin N. M., Frolova L. A., Shneidman Y. T. Abiotic factors influencing the formation of recent Cladocera community structures in tundra lakes in the Pechora River delta (Nenets Autonomous Okrug). J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 347–364. EDN: BRZXZS



Влияние абиотических факторов на формирование структуры рецентных сообществ Cladocera ряда тундровых озёр Малоземельской тундры

Н. М. Нигматуллин^а, Л. А. Фролова^б, Я. Т. Шнейдман^в

^аКазанский (Приволжский) федеральный университет

Российская Федерация, Казань

^бИнститут археологии и этнографии Сибирского отделения РАН

Российская Федерация, Новосибирск

^вМосковский физико-технический институт

Российская Федерация, Долгопрудный

Аннотация. Арктические пресноводные экосистемы претерпевают значительные изменения, связанные с глобальной переменной климата и возрастающим антропогенным воздействием, что приводит к кардинальной перестройке биологических систем. В то же время знания об арктической пресноводной фауне остаются отрывочными и неполными. Ветвистоусые ракообразные (Cladocera), являясь важным компонентом пресноводных экосистем, признаны эффективными индикаторами, отражающими экологические условия водоёмов и чутко реагирующими на происходящие в них изменения. В настоящей работе мы исследовали роль локальных абиотических факторов в формировании состава сообществ Cladocera в поверхностных донных отложениях 47 тундровых озёр в дельте реки Печоры (Малоземельская тундра). Для изучения таксономического разнообразия ветвистоусых ракообразных исследованных озёр был применён палеолимонологический анализ. Также были получены данные о морфометрических и гидрохимических характеристиках водоёмов. Связи между кладоцерными сообществами и абиотическими параметрами среды анализировались с применением методов ординации (анализ избыточности, RDA) и корреляционного анализа Спирмена. Были выявлены три экологические переменные, оказывающие наибольшее влияние

на структуру сообществ Cladocera: минерализация, pH и площадь водоёма. Эти характеристики оказались наиболее изменчивыми в исследованной выборке озёр. Наиболее сильная положительная корреляция с минерализацией выявлена для количества остатков *Pleuroxus uncinatus* и *Alona quadrangularis*, тогда как количество остатков *Bosmina (Eubosmina) longispina* и *Alonopsis elongata* отрицательно коррелируют с минерализацией и pH. Значимая положительная корреляция с площадью водоёма обнаружена для количественных показателей *Bosmina (Eubosmina) longispina*, отрицательная – для количества остатков *Chydorus cf. sphaericus*. Наше исследование подтверждает высокий потенциал Cladocera как индикаторов в палеоэкологических исследованиях северных экосистем, что представляет особый интерес в контексте изучения изменений окружающей среды.

Ключевые слова: Cladocera, дельта реки Печоры, арктические пресноводные экосистемы, палеолимнологический анализ.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках гранта от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075–15–2024–554 от 24.04.2024).

Цитирование: Нигматуллин Н. М. Влияние абиотических факторов на формирование структуры рецентных сообществ Cladocera ряда тундровых озёр Малоземельской тундры / Н. М. Нигматуллин, Л. А. Фролова, Я. Т. Шнейдман // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 347–364. EDN: BRZXZS

Введение

Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) являются важным компонентом планктонной и бентосной фауны ракообразных в озёрах и прудах. Выполняя роль первичных консументов, они способствуют перераспределению питательных веществ в толще воды. Кроме того, ветвистоусые ракообразные составляют значительную часть рациона планктоноядных рыб и беспозвоночных. Благодаря своему трофическому положению, кладоцера играют ключевую роль в передаче углерода и энергии в пищевой сети (Frey, 1986; Rautio, 2007). Как основная группа зоопланктона ветвистоусые ракообразные часто доминируют в ключевых водных экологических группировках, включая планктонные, нейстонные, бентосные и сложные фитофильные ценозы (Nevalainen et al., 2008; Frolova et al., 2014). Высокая распространенность кладоцер в пресноводных экосистемах по всему миру, а также их отличная сохранность в озерных отложениях делают их субфоссильные остатки

ценным индикатором для палеолимнологических исследований (Frey, 1960; Hann, 1989).

Cladocera являются одними из наиболее часто встречающихся остатков животных в озерных отложениях. Они предоставляют важную информацию об экологических событиях и изменениях, таких как климатические флуктуации, колебания трофического статуса, процессы окисления и изменения уровня воды (Korhola, Rautio, 2001). Кладоцера одна из немногих групп водных животных, которые регулярно используются для реконструкции прошлого. В донных отложениях их остатки накапливаются в хронологической последовательности, сохраняя количественные соотношения литоральных и пелагических ветвистоусых ракообразных (Смирнов, 1978; Korhola, Rautio, 2001). Субфоссильные остатки Cladocera зарекомендовали себя надежными экологическими индикаторами для пресноводных экосистем (Goulden, 1969; Davidson et al., 2007; Szeroczyńska, 2016; Frolova, 2018; Frolova et al., 2019a).

Ветвистоусые ракообразные являются высокочувствительным компонентом водной биоты, способным быстро реагировать на изменения таких факторов, как температура, pH и уровень кислорода, изменяя свои функциональные характеристики и таксономический состав (Hann, 1989; Lotter et al., 1997). Эта чувствительность делает их остатки в озерных отложениях ценным инструментом для выявления изменений окружающей среды. Анализ субфоссильных остатков позволяет провести всестороннюю реконструкцию истории экосистем на протяжении всего голоцена (Frey, 1960; Назарова и др., 2008; Nevalainen, Luoto, 2010; Frolova et al., 2016).

Кроме того, карцинологический анализ может быть рекомендован для экспресс-оценки современного состава ветвистоусых ракообразных, так как их остатки, сохранившиеся в верхних слоях донных отложений, отражают среднесезонное состояние сообществ гидробионтов за последние годы. Этот подход позволяет выявить среднеголетнюю биоценотическую структуру, а также определить доминирующие и редкие виды (Frey, 1962; Ibragimova et al., 2016). Это обусловлено тем, что в составе донных отложений содержатся виды, которые обитали в различные периоды вегетационного сезона (Frey, 1960, 1964, 1988). Такой метод изучения состава кладоцерного сообщества предлагается использовать в исследованиях малоизученных арктических и субарктических водоемов (Sarmaja-Korjonen, 2002; Фролова, 2011; Frolova et al., 2018; Нигматуллин и др., 2021).

Субарктические и арктические пресноводные экосистемы считаются чувствительными к глобальному изменению климата: даже незначительное повышение температуры сокращает продолжительность ледового покрова водоема в течение сезона, что, в свою очередь, увеличивает продолжительность ве-

гетационного периода водорослей и других организмов. Пресноводные озера и пруды являются важной частью северных ландшафтов, и климатические изменения, как прогнозируется, окажут значительное влияние на водные экосистемы (Smol et al., 2005; Фролова, Ибрагимова, 2015; Nigamatzyanova et al., 2020). Это делает высокоширотные озера важными объектами исследований, поскольку они служат индикаторами глобальных изменений (Rautio, 1998; Nazarova et al., 2013; Новичкова, 2016; Frolova et al., 2019b). Особенно многочисленны и широко распространены арктические олиготрофные мелководные озера и пруды, которые играют ключевую роль в поддержании биоразнообразия Арктики, выступая в качестве своеобразных оазисов в тундре (Alhonen, 1972; Davidson et al., 2007).

Однако понимание того, как пресноводные сообщества арктических регионов будут реагировать на дальнейшее изменение климата, затруднено для многих групп организмов, поскольку информации об их современном распределении и о факторах, влияющих на структуру сообществ и регулирующих их распространение недостаточно (Sweetman et al., 2010; Nevalainen, Luoto, 2010; Frolova, Frolova, 2017). Поскольку большинство арктических и субарктических озер расположены в удаленных и труднодоступных районах, получение информации о кладоцерных сообществах в этих водоемах может представлять сложность. В настоящее время существует очень мало данных о кладоцерных сообществах арктических территорий России, в том числе и дельты реки Печоры (Фролова, 2011; Szeroczyńska, 2016; Frolova, 2018). Информация о фауне ветвистоусых ракообразных дельты реки Печоры основывается на единичных исследованиях зоопланктонных сообществ последних лет (Sadyrin, 2000; Черевичко и др., 2011; Фефилова, Кононова, 2018;

Nigmatullin, Frolova, 2019; Frolova et al., 2019b). Исследования рецентных и субфоссильных кладоцерных сообществ донных отложений озер ранее не проводились.

Поскольку этот регион считается одним из наиболее чувствительных к изменениям окружающей среды, важно определить факторы, контролирующие текущее распределение кладоцер. Более того, из-за выраженных климатических и экологических градиентов высокоширотные регионы являются критически важными для изучения влияния экологических факторов на распределение пресноводных сообществ (Sweetman et al., 2010). В связи с этим была определена цель настоящей работы: выявить наиболее значимые абиотические параметры (морфометрические и физико-химические), влияющие на распределение таксонов *Cladocera* в исследованных озерах дельты реки Печоры. Для выполнения наших задач мы выбрали палеоолимологический метод исследования, так как данный метод позволяет получить информацию о среднемноголетнем состоянии кладоцерных сообществ, которые можно сравнить с существующими экологическими условиями (Freu, 1960, 1962).

Материалы и методы

Регион исследования

Рассматриваемая территория находится в субарктической климатической зоне и испытывает влияние Северного Ледовитого океана, арктических и атлантических воздушных масс (Van der Sluis et al., 2003). Климат суровый: морской на побережье и более континентальный в глубине материка. Температура колеблется от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ летом, среднесуточная превышает $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ с мая по октябрь, а период без заморозков длится около четырех месяцев. Полярная ночь продолжается с декабря по январь, а полярный

день – с мая по июль. Зимой снежный покров достигает 3–4 м и сохраняется до восьми месяцев. Погодные условия нестабильны из-за чередования атлантических циклонов и арктических воздушных масс, что зимой вызывает метели, а летом – похолодания и заморозки (Ливеровский, 1933; Левашенко, Мясоева, 2007).

Река Печора – самая большая и полноводная река бассейна Северного Ледовитого океана в пределах европейской части России. Водосборный бассейн Печоры охватывает $324\,000\text{ км}^2$, а длина реки составляет 1809 км (Лукин и др., 2000). Печора имеет самый высокий средний расход воды среди европейских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Она протекает по обширным Печорским низменностям, ограниченным с востока Уральскими горами, а с запада и юго-запада Тиманским кряжем (Panchenko et al., 2024). Река Печора впадает в юго-восточный залив Баренцева моря, называемый Печорской губой, образуя крупную и сложную дельту. Мелководная юго-западная часть Печорской губы, в свою очередь, называется Коровинской губой и граничит с эстуарным побережьем. Общая площадь дельты Печоры составляет 3250 км^2 (Lavrinenko, Sadyrin, 2000).

В бассейне Печоры насчитывается более 60 тыс. озёр с общей площадью водной поверхности 4019 км^2 (Коковкин, 2016). Большинство из них имеют небольшие размеры и расположены в бессточных понижениях рельефа, их площадь редко превышает 2 км^2 . Лишь немногие имеют площадь более 10 км^2 (Brittain et al., 2022). Большинство озёр образовались в результате термокарстовых процессов (Lavrinenko, Sadyrin, 2000; Дедов, 2006). Эта территория относится к области широкого распространения преимущественно малых и средних термокарстовых озёр. Они характеризуются простыми округлыми очертаниями,

небольшой глубиной, торфянистыми обрывистыми берегами и торфянистым дном. Сток из таких озер очень слабый и отмечается только в период весеннего поднятия уровня (Дау-вальтер, Хлопцева, 2008). Кроме того, некоторые озера имеют ледниково-термокарстовое происхождение. Они относительно глубокие и формируются под воздействием движущегося ледника, который перерабатывает минеральную поверхность, создавая неровный, холмистый рельеф (Ливеровский, 1933; Lavrinenko, Sadyrin, 2000).

Отбор проб

и лабораторная обработка образцов

Проведены комплексные гидрологические, гидрохимические и палеолиминалогические исследования 47 тундровых озер в дельте р. Печоры. В ходе летних экспедиций в 2017–2020 гг. на территории Государственного природного заповедника «Ненецкий» было отобрано 92 образца воды и 47 проб поверхностных донных отложений из исследованных озер. В точке отбора палеолиминалогических образцов при помощи многопараметрового анализатора (Multi 3420 SetG WTW) осуществлялось измерение основных физико-химических характеристик воды (температуры воды, минерализации (TDS), pH, абсолютной и относительной концентрации растворенного кислорода, удельной электропроводности, окислительно-восстановительного потенциала) во всех исследованных озерах. Образцы воды для дальнейшего анализа на ионный состав в камеральных условиях отбирались в поверхностном слое воды на глубине 0,2–0,5 м в пластиковые бутылки емкостью 1 л. Далее воду фильтровали в пробирки объемом 30 мл через целлюлозно-ацетатный фильтр (размер пор 0,45 мкм). Отбор поверхностных донных отложений (верхние 0–2 см грунта) озер

выполнялся с помощью стратифицированного дночерпателя Экмана-Берджа (20х20) по возможности в наиболее глубокой части водоема, которая определялась при помощи ручного эхолота Speedtech Depthmate SM-5, координаты фиксировались портативным GPS-навигатором Garmin. Данные о площади озер и высоте над уровнем моря в точке отбора образцов были определены в картах Google Earth. Данные о среднегодовых температурах и осадках взяты из официального сайта ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (meteo.ru).

Определение растворённых в воде катионов и анионов проводилось методом капиллярного электрофореза с использованием системы «Капель 105М» после предварительной градуировки. Пробоподготовка включала центрифугирование образцов, буферных и промывочных растворов. Анализ выполняли при 20 °С: для анионов – при напряжении –17 кВ и длине волны 374 нм, для катионов – при 25 кВ и 267 нм. Каждый образец анализировали дважды, регистрируя по одной электрофореграмме.

Для палеолиминалогического анализа образцов поверхностных донных отложений использовали общепризнанную методику (Korhola, Rautio, 2001). Навеску 0,5 г предварительно высушенного образца растворяли в 10 %-м растворе KOH. Раствор нагревали при 75 °С в течение 30 минут, готовую суспензию промывали под проточной водой через сито с ячейей 50 мкм. Полученные остатки смывали из сита при помощи дистиллированной воды в емкости объемом 12,5 мл. В образцы добавляли 3–4 капли красителя сафранина и 96 % этилового спирта.

Слайды с остатками рецентных Cladocera просматривали под световым микроскопом Axio Lab.A1 при увеличении x100–400 раз. Встреченные фрагменты кладоцер (створки, головные щиты, постабдомены, коготки,

эфиппии, мандибулы и хвостовые иглы) идентифицировались до вида или рода с использованием специализированных определительных ключей субфоссильных и современных Cladocera (Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen, 2007; Котов и др., 2010; Bledzki, Rybak, 2016; Коровчинский и др., 2021).

Статистическая обработка данных

Классы доминирования Cladocera по численности выделяли согласно шкале Любарского (1974) (табл. 1).

Анализируемые абиотические данные включали физико-химические параметры, влияющие на состав сообществ Cladocera: температура воды, средняя температура воздуха в июле и в январе, среднегодовые осадки, географическое положение (координаты), высота над уровнем моря, глубина и площадь водоема, электропроводность, pH, редокс-потенциал, кислород, ионный состав (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-) и минерализация (TDS) (табл. 2). Данные были преобразованы корневым образом и проверены на нормальность при помощи анализа их асимметричности. Для сильно асимметричных параметров (высота над уровнем моря, SO_4^{2-} , Ca^{2+} , глубина отбора проб) было применено логарифмическое преобразование $\ln(x+1)$. Для оценки длины экологического градиента и выбора между унимодальными и линейными ме-

тодами использовался DCA-анализ (Leps, Šmilauer, 2003). Метод выявил, что длина экологического градиента 1,975, что указывало на возможность применения линейного метода ординации RDA (Birks, 1995). В статистический анализ включены таксоны Cladocera с относительной численностью $\geq 2\%$ в одном озере (ter Braak, Prentice, 1988). Для выявления связей между факторами среды и распределением Cladocera проведен RDA-анализ в программе CANOCO 4.5 (ter Braak, Šmilauer, 2002; Nazarova et al., 2011).

Кроме того, применена методика расчета коэффициента ранговой корреляции Спирмена (Spearman, 1904), которая заключается в определении степени связи между двумя переменными на основе их ранговых значений. Коэффициент корреляции Спирмена (r_s) вычисляется для пары переменных и значений в диапазоне от -1 до $+1$. Для последующего анализа учитывались только статистически значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0,05$). Коэффициенты корреляции Спирмена являются ковариациями двух наборов данных, нормированными на средние отклонения в этих наборах. Положительное значение коэффициента соответствует положительной корреляции, и наоборот. Коэффициенты корреляции Спирмена вместе с p -уровнем значимости были получены с использованием библиотеки `scipy` на языке Python.

Таблица 1. Шкала доминирования Любарского по численности

Table 1. Lyubarsky's dominance scale based on abundance

Балл	Граница классов по численности (N- доля вида в общей численности, %)	Степень доминирования
1	$0 < N \leq 4$	Малозначимый вид
2	$4 < N \leq 16$	Второстепенный вид
3	$16 < N \leq 36$	Субдоминант
4	$36 < N \leq 64$	Доминант
5	$64 < N \leq 100$	Абсолютный доминант

Таблица 2. Статистические показатели морфометрических и гидрохимических параметров озер дельты Печоры в 2017–2020 гг.

Table 2. Statistical indicators of morphometric and hydrochemical parameters of the lakes in the Pechora Delta in 2017–2020

Показатель	Min	Среднее	Max	Медиана	Асимметрия	±SE	*Анализ
Глубина _{max} , м	0,40	1,69	9,00	0,90	2,64	0,31	RDA, KA
Глубина _{отбор} , м	0,40	1,67	9,00	0,90	2,73	0,30	RDA
$T_{\text{воды}}$, °C	9,60	12,70	18,00	12,40	0,58	0,26	RDA, KA
$T_{\text{июля}}$, °C	10,49	10,72	10,99	10,72	0,15	0,02	RDA, KA
$T_{\text{января}}$, °C	-16,88	-16,62	-16,36	-16,69	0,50	0,03	RDA, KA
Среднегодовые осадки, мм	407	422	430	424	-0,84	0,92	RDA, KA
Электропроводность, мкСм/см	10,30	87,29	1344,00	26,50	4,67	34,75	RDA, KA
Минерализация (TDS), мг/л	10,00	86,48	1346,00	28,00	4,67	32,52	RDA, KA
Площадь озера (S), км ²	0,001	0,22	2,15	0,09	3,82	0,05	RDA, KA
pH	5,34	6,68	8,71	6,73	0,57	0,13	RDA, KA
Редокс-потенциал (Eh)	-85,2	34,46	111,80	42,80	-0,51	7,17	RDA, KA
O ₂ , мг/л	8,85	10,49	11,48	10,64	-0,87	0,08	RDA
O ₂ , %	85,90	99,91	109,60	101,55	-0,64	0,98	RDA
Калий (K ⁺), мг/л	0,15	0,71	11,59	0,00	4,80	0,27	
Натрий (Na ⁺), мг/л	1,45	11,20	201,35	3,23	4,87	4,83	RDA, KA
Магний (Mg ²⁺), мг/л	0,13	1,64	21,15	0,49	4,06	0,54	RDA, KA
Кальций (Ca ²⁺), мг/л	0,26	4,04	46,39	1,18	3,67	1,19	RDA, KA
Хлориды (Cl ⁻), мг/л	1,56	18,42	363,95	4,17	4,88	0,95	RDA, KA
Сульфаты (SO ₄ ²⁻), мг/л	0,23	1,95	17,40	0,90	3,09	0,50	RDA, KA
Гидрокарбонаты (H ₂ CO ₃), мг/л	0,61	18,42	265,13	4,17	4,83	0,27	

* Типы анализов, в которых были использованы параметры, приведённые в таблице: RDA – анализ избыточности, KA – корреляционный анализ Спирмена. RDA также включал значение высоты озера над уровнем моря и географическое положение (координаты).

Результаты

Гидрохимический анализ

Статистические показатели морфометрических и гидрохимических характеристик исследованных озер дельты Печоры приведены в табл. 2. Большинство исследованных озёр дельты р. Печоры периодически заливаются речной водой и более минерализованной водой из Коровинской губы, а их глубина часто составляет менее 2 м. Максимальная глубина озер варьировала в пределах от 0,4 до 9,0 м, в среднем для выборки составляя 1,69 м. Площадь озер не велика, она характеризуется средним значением 0,22 км², с минимальными

и максимальными значениями 0,001 км² и 2,15 км² соответственно. Большая часть изученных водоемов характеризовалась низкой степенью минерализации (среднее значение TDS = 86,48±32,52 мг/л) и была отнесена к ультрапресным водам (менее 200 мг/л) (Алекин, 1953). Значения минерализации в водоемах колеблются от 10,00 до 1346,00 мг/л. Три озера из полученной выборки отличались высокой степенью минерализации: 20-Ре-01 (1346 мг/л), 20-Ре-02 (686 мг/л) и 20-Ре-03 (388 мг/л). Это обусловлено их расположением в прибрежной низменности, подверженной периодическим затоплениям водами Коро-

винской губы. Значения водородного показателя (pH) озер варьируют в пределах слабых и щелочных значений (от 5,34 до 8,71 соответственно), со средним значением 6,68. Среднее значение температуры воды в озерах в период исследований составило +12,70 °C (min = +9,60 °C, max = +18,00 °C). Электропроводность воды в озерах дельты Печоры изменялась в пределах от 10,30 мкСм/см до 1344,00 мкСм/см, со средним показателем 87,29±34,75 мкСм/см. Содержание растворенного кислорода в озерах оказалось высоким и менялось в диапазоне от 8,85 мг/л (85,90 % насыщения) до 11,48 мг/л (109,60 % насыщения), со средним значением 10,49 мг/л (99,91 %).

В результате проведенного анализа образцов воды из арктических озер дельты Печоры в системе капиллярного электрофореза «Капель 105М» были обнаружены следующие ионы: аммоний (NH_4^+), калий (K^+), натрий (Na^+), магний (Mg^{2+}), кальций (Ca^{2+}), хлориды (Cl^-), сульфаты (SO_4^{2-}) и гидрокарбонаты (H_2CO_3) (расчетным методом). Сумма растворенных в воде ионов исследованных озер варьировала от 5,62 до 894,21 мг/л. Общая жесткость воды в озерах менялась в диапазоне от 0,02 до 2,42 мг-экв/л, со средним значением 0,34 мг-экв/л.

Кладацерный анализ

В ходе исследования были проанализированы образцы поверхностных донных отложений из 47 озер дельты Печоры. В общей сложности был выявлен 41 таксон ветвистоусых ракообразных, относящихся к восьми семействам. Наибольшее таксономическое разнообразие отмечено у семейства Chydoridae, которое составляет 68 % от общего числа видов. Остальные семейства представлены в меньшей степени: Daphniidae (10 %), Bosminidae (7 %), Euryercidae (5 %), Cercopagidae (2 %), Sididae (2 %), Leptodoridae

(2 %) и Pycnogonidae (2 %). В целом в исследованных образцах поверхностных отложений озер обнаружено более 20 800 остатков Cladocera. В среднем на один образец приходилось 184,7±6,4 экземпляров ветвистоусых ракообразных.

Анализ сообществ Cladocera показал, что, согласно шкале Любарского (1974), доминирующим видом является *Bosmina (Eubosmina) longispina* (Leydig, 1860) (44,43 % от общего числа зарегистрированных особей) – холодноводный вид, характерный для северных регионов России (Котов и др., 2010). Субдоминантным таксоном выступает широко распространенный *Chydorus cf. sphaericus* (O. F. Müller, 1776) (28,36 %), обитающий преимущественно в прибрежных зонах. Среди менее многочисленных видов выделяются прибрежные таксоны *Alonella nana* (Baird, 1850) (4,48 %) и *Biapertura affinis* (Leydig, 1860) (3,65 %). Кроме того, впервые были отмечены новые для северо-востока европейской части России редкие таксоны *Phreatolona protzi* (Hartwig, 1900) и *Rhynchotalona latens* (Sarmaja-Korjonen, Hakojärvi et Korhola, 2000).

Ординационный анализ (RDA)

Анализ соответствия с удаленным трендом (DCA) выявил, что длина экологического градиента составила 1,975, указывая на возможность применения линейного метода RDA (ter Braak, Šmilauer, 2002). С использованием анализа избыточности, RDA, основанного на изучении рецентных ветвистоусых ракообразных из поверхностных донных отложений озер, было показано, что минерализация, pH и площадь водоема составляют минимальный набор экологических параметров, наиболее достоверно объясняющих структуру сообществ Cladocera в исследованных озерах (рис. 1). Первая ось RDA ($\lambda_1=0,175$) и вторая ось ($\lambda_2=0,043$) были статистически значимы

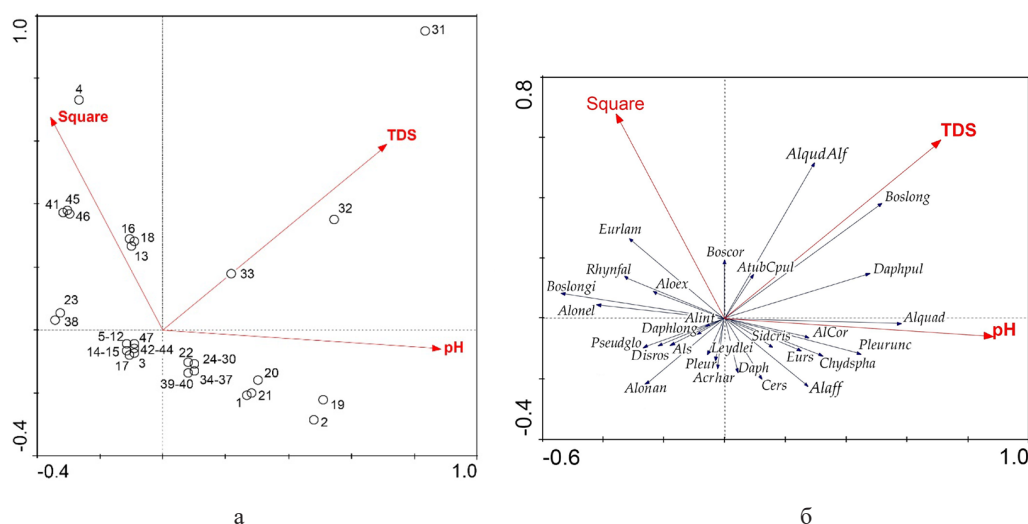


Рис. 1. Ординационная диаграмма, построенная по результатам анализа избыточности (RDA) для рецентных кладоцер, иллюстрирующая взаимосвязь между наиболее значимыми экологическими факторами и местом обитания (а) и наиболее часто встречающимися таксонами Cladocera (б). Факторы среды: pH, минерализация (TDS), площадь (square). Таксоны на рисунке б: Acrhar – *Acroperus harpae*, Alaff – *Biapertura affinis*, AlCor – *Alona guttata* / *Coronatella rectangula*, Alint – *Alona intermedia*, Alquad – *Alona quadrangularis*, AlqudAlf – *Alona quadrangularis* / *Biapertura affinis*, Als – *Alona* sp., Aloex – *Alonella excisa*, Alonan – *Alonopsis elongata*, Alonel – *Alonopsis elongata*, AtubCpul – *Alona guttata tuberculata* / *Coronatella rectangula pulchra*, Boscor – *Bosmina (E.) coregoni*, Boslong – *Bosmina longirostris*, Boslongi – *Bosmina (Eubosmina) longispina*, Cers – *Ceriodaphnia* sp., Chydspha – *Chydorus cf. sphaericus*, Daphlong – *Daphnia longispina* gr., Daph – *Daphnia* sp., Daphpul – *Daphnia pulex*, Disros – *Disparalona rostrata*, Eurlam – *Eurycercus lamellatus*, Eurs – *Eurycercus* spp., Leydle – *Leydigia leidigi*, Pleurunc – *Pleuroxus uncinatus*, Pleur – *Pleuroxus* sp., Pseudglo – *Pseudochydorus globosus*, Rhynfal – *Rhynchotalona falcata*, Sidcris – *Sida crystallina*

Fig. 1. Ordination diagram based on Redundancy Analysis (RDA) results for recent Cladocera, illustrating the relationship between the most significant environmental factors and habitat (a) and the most frequently occurring Cladocera taxa (b). Environmental factors: area of water body (square), pH, and total dissolved solids (TDS). Taxa in Figure b: Acrhar – *Acroperus harpae*, Alaff – *Biapertura affinis*, AlCor – *Alona guttata* / *Coronatella rectangula*, Alint – *Alona intermedia*, Alquad – *Alona quadrangularis*, AlqudAlf – *Alona quadrangularis* / *Biapertura affinis*, Als – *Alona* sp., Aloex – *Alonella excisa*, Alonan – *Alonopsis elongata*, Alonel – *Alonopsis elongata*, AtubCpul – *Alona guttata tuberculata* / *Coronatella rectangula pulchra*, Boscor – *Bosmina (E.) coregoni*, Boslong – *Bosmina longirostris*, Boslongi – *Bosmina (Eubosmina) longispina*, Cers – *Ceriodaphnia* sp., Chydspha – *Chydorus cf. sphaericus*, Daphlong – *Daphnia longispina* gr., Daph – *Daphnia* sp., Daphpul – *Daphnia pulex*, Disros – *Disparalona rostrata*, Eurlam – *Eurycercus lamellatus*, Eurs – *Eurycercus* spp., Leydle – *Leydigia leidigi*, Pleurunc – *Pleuroxus uncinatus*, Pleur – *Pleuroxus* sp., Pseudglo – *Pseudochydorus globosus*, Rhynfal – *Rhynchotalona falcata*, Sidcris – *Sida crystallina*

ми ($p \leq 0,05$) и объяснили 76,75 % и 18,83 % распределения таксонов в сообществах.

Корреляционный анализ Спирмена

Для выявления взаимосвязей между парами исследуемых характеристик озерных экосистем проведен корреляционный анализ с применением коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s). Проведенный анализ

позволил выявить множество статистически значимых взаимосвязей таксонов рецентных Cladocera и абиотических параметров (морфометрических и физико-химических) среды, визуализированные в виде хитмапа на рис. 2.

Наибольшее количество достоверных корреляций с таксонами Cladocera обнаружено для показателей: pH, температура воды, минерализация, электропроводность

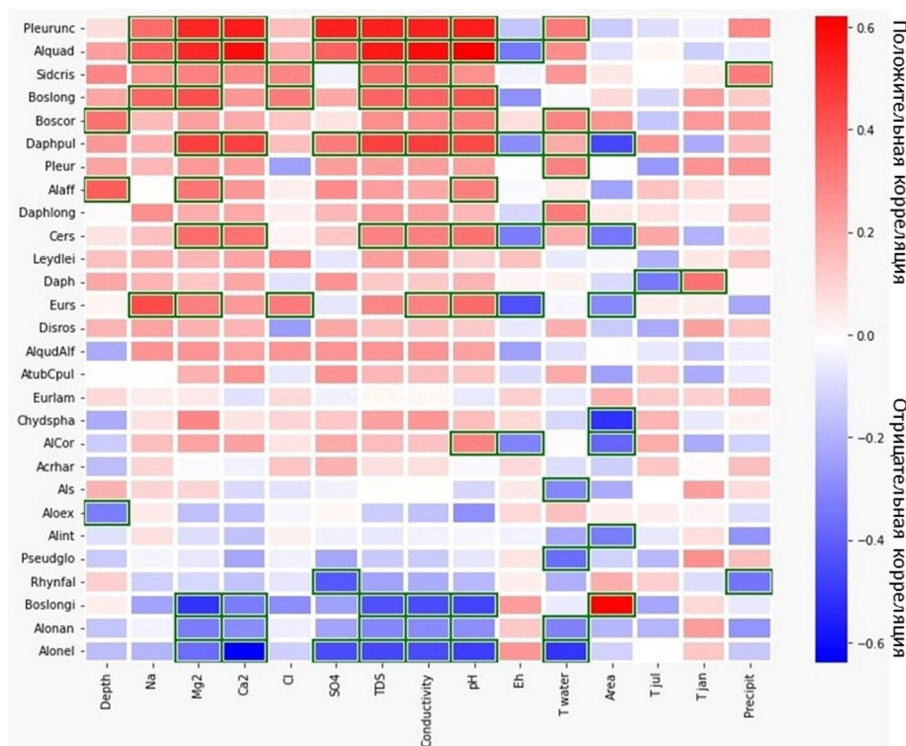


Рис. 2. Корреляции абиотических показателей с количеством остатков рецентных Cladocera в исследованных озерах дельты р. Печоры. Абиотические параметры среды: Depth (глубина водоема), Na^+ (натрий), Mg^{2+} (магний), Ca^{2+} (кальций), Cl^- (хлориды), SO_4^{2-} (сульфаты), TDS (минерализация), conductivity (электропроводность), pH, Eh (окислительно-восстановительный потенциал), T water (температура воды), Area (площадь водоема), T jul (средняя температура июля), T jan (средняя температура января), precipit (количество осадков). Сокращения таксонов: *Pleuroxus uncinatus* (Pleurunc), *Alona quadrangularis* (Alquad), *Sida crystallina* (Sidcris), *Bosmina longirostris* (Boslong), *Bosmina (E.) coregoni* (Boscor), *Daphnia pulex* (Daphpul), *Pleuroxus* sp. (Pleur), *Biapertura affinis* (Alaff), *Daphnia longispina* (Daphlong), *Ceriodaphnia* sp. (Cers), *Leydigia leidigi* (Leydle), *Daphnia* sp. (Daph), *Eurycercus* spp. (Eurs), *Disparalona rostrata* (Disros), *Alona quadrangularis* / *Biapertura affinis* (AlquadAlf), *Alona guttata tuberculata* / *Coronatella rectangula pulchra* (AtubCpul), *Eurycercus lamellatus* (Eurlam), *Chydorus cf. sphaericus* (Chydspha), *Alona guttata* / *Coronatella rectangula* (AlCor), *Acroperus harpae* (Acrhar), *Alona* sp. (Als), *Alonella excisa* (Aloex), *Alona intermedia* (Alint), *Pseudochydorus globosus* (Pseudglo), *Rhynchotalona falcata* (Rhynfal), *Bosmina (E.) longispina* (Boslongi), *Alonella nana* (Alonan), *Alonopsis elongata* (Alonel). Зеленым прямоугольником выделены статистически значимые достоверные корреляции (p-value < 0,05)

Fig. 2. Correlations between abiotic parameters and the abundance of recent Cladocera in the studied lakes of the Pechora River delta. Abiotic environmental parameters: Depth (depth of water body), Na^+ (sodium), Mg^{2+} (magnesium), Ca^{2+} (calcium), Cl^- (chlorides), SO_4^{2-} (sulfates), TDS (mineralization), conductivity (electrical conductivity), pH, Eh (oxidation-reduction potential), T water (water temperature), Area (area of water body), T jul (average temperature of July), T jan (average temperature of January), precipit (amount of precipitation). Taxon abbreviations: *Pleuroxus uncinatus* (Pleurunc), *Alona quadrangularis* (Alquad), *Sida crystallina* (Sidcris), *Bosmina longirostris* (Boslong), *Bosmina (E.) coregoni* (Boscor), *Daphnia pulex* (Daphpul), *Pleuroxus* sp. (Pleur), *Biapertura affinis* (Alaff), *Daphnia longispina* (Daphlong), *Ceriodaphnia* sp. (Cers), *Leydigia leidigi* (Leydle), *Daphnia* sp. (Daph), *Eurycercus* spp. (Eurs), *Disparalona rostrata* (Disros), *Alona quadrangularis* / *Biapertura affinis* (AlquadAlf), *Alona guttata tuberculata* / *Coronatella rectangula pulchra* (AtubCpul), *Eurycercus lamellatus* (Eurlam), *Chydorus cf. sphaericus* (Chydspha), *Alona guttata* / *Coronatella rectangula* (AlCor), *Acroperus harpae* (Acrhar), *Alona* sp. (Als), *Alonella excisa* (Aloex), *Alona intermedia* (Alint), *Pseudochydorus globosus* (Pseudglo), *Rhynchotalona falcata* (Rhynfal), *Bosmina (E.) longispina* (Boslongi), *Alonella nana* (Alonan), *Alonopsis elongata* (Alonel). The green rectangle highlights statistically significant correlations (p-value < 0.05)

и площадь водоема. Наименее значимыми параметрами при формировании структуры сообществ ветвистоусых ракообразных оказались: средняя температура июля и января, количество осадков. Это объясняется отсутствием градиента температур в нашей выборке озер, все исследованные объекты расположены в пределах от 68°11 до 68°25 N и от 53°16 до 53°47 E.

Обсуждение результатов

Результаты анализа избыточности RDA показывают, что наиболее значимое влияние на состав и структуру кладоцерных сообществ исследованных водоемов оказывал такой абиотический параметр, как общая минерализация вод. Отметим, что большинство исследованных озер характеризуются как ультрапресные ($TDS=86,48\pm32,52$ мг/л), и лишь три озера, периодически затопляемые Печорской губой, отличаются относительно высокой минерализацией (20-Ре-01=1344 мг/л; 20-Ре-02=686 мг/л; 20-Ре-03=388 мг/л). Другой значимый при формировании сообществ ветвистоусых ракообразных фактор – активная реакция среды (pH). Третий фактор, значимо влияющий на состав и структуру сообществ кладоцер, – площадь водоемов. Большинство озер в выборке имеют малые размеры. Наибольшая положительная связь с уровнем минерализации выявлена для таксона *Bosmina longirostris* (O.F. Müller, 1776), с показателями pH для *Alona quadrangularis* (O.F. Müller, 1776), при этом *A. nana* имеет отрицательную связь с обоими параметрами. Группа таксонов *Daphnia pulex* имеет одинаковую положительную связь с минерализацией и pH. Наибольшая положительная связь с площадью водоема выявлена для *B. (E.) longispina* и *Rhynchotalona falcata*.

Корреляционный анализ Спирмена показал, что pH, температура воды, минерализа-

ция, электропроводность и площадь водоема имели наибольшее количество достоверных корреляций с таксонами Cladocera. Корреляция с глубиной водоема обнаружена для трех таксонов: *Bosmina (Eubosmina) coregoni* (Baird, 1857), *B. affinis* и *Alonella excisa* (Fischer, 1854).

Водородный показатель (pH) играет важную роль в формировании структуры кладоцерных сообществ, оказывая значительное влияние на распределение таксонов. Наиболее сильная положительная достоверная корреляция с pH выявлена для *Pleuroxus uncinatus* (Baird, 1850) и *A. quadrangularis*. Менее значимые, но также достоверные связи обнаружены для *B. longirostris*, *B. (E.) coregoni*, *D. pulex* gr., *B. affinis*, *Ceriodaphnia* sp., *Eurycercus* sp. и *Alona guttata* / *Coronatella rectangula*. Согласно литературным данным, *P. uncinatus* действительно предпочитает более высокие значения pH ($pH > 6$), а для *A. quadrangularis* характерен широкий диапазон значений pH и толерантность к кислым водам (Błędzki, Rybak, 2016). Сильная достоверная отрицательная связь с pH выявлена для *B. (E.) longispina* и *Alonopsis elongata* (Sars, 1861), что согласуется с литературными данными (Котов и др., 2010). Кроме того, выявлена отрицательная, но недостоверная связь с pH для *A. nana*. При этом в литературе для данного таксона указываются низкие значения pH (Смирнов, 1971). Вероятно, связь достоверно не подтверждается из-за недостаточной выборки, так как остатки *A. nana* в исследованных озерах были малочисленными.

Наиболее сильные достоверные положительные связи с минерализацией и электропроводностью обнаружены у *P. uncinatus*, *A. quadrangularis* и *D. pulex* gr. В то же время достоверные отрицательные корреляции с этими показателями выявлены для *B. (E.) longispina*, *A. nana* и *A. elongata*. Кро-

ме того, *P. uncinatus* и *A. quadrangularis* положительно достоверно коррелируют с концентрацией ионов магния и кальция, тогда как у *B. (E.) longispina*, *A. nana* и *A. elongata* обнаружена высокая отрицательная корреляция с этими ионами. Согласно литературным данным, *A. elongata* предпочитает подкисленные водоемы с низким содержанием кальция (Błędzki, Rybak, 2016), что подтверждается результатами нашего исследования.

Площадь водоема оказалась важным фактором, влияющим на распределение таксонов ветвистоусых ракообразных в сообществах исследованных водоемов дельты реки Печоры. Достоверно высокая отрицательная корреляция с площадью водоема выявлена для доминирующего таксона *C. cf. sphaericus*. В то же время другой доминант, *B. (E.) longispina*, демонстрирует достоверно высокую положительную корреляцию с этим показателем.

Сравнение результатов оценки воздействия отдельных абиотических факторов на Cladocera, полученных в результате ординационного анализа и при помощи корреляционного анализа Спирмена позволяют утверждать, что площадь водоема, pH и минерализация наиболее значимо влияют на формирование структуры кладоцерных сообществ в исследованных озерах дельты реки Печоры (рис. 1, 2). Кроме того, согласно корреляционному анализу Спирмена, для отдельных таксонов значимыми факторами были электропроводность и температура воды (рис. 2). Оба метода выявили достоверную положительную корреляцию с ми-

нерализацией для таксонов *B. longirostris* и *D. pulex* gr., высокую положительную корреляцию с pH для *A. quadrangularis*, а также достоверную отрицательную корреляцию с минерализацией и pH для *B. (E.) longispina*, *A. nana* и *A. elongata*.

Заключение

Анализ взаимосвязи таксонов Cladocera с абиотическими факторами среды показал, что ключевыми лимнологическими и физико-химическими параметрами, определяющими структуру сообществ в исследованных озерах дельты реки Печоры, являются минерализация, pH и площадь водоема. Большинство исследованных озер характеризовались низкой степенью минерализации и pH. Анализ избыточности (RDA) подтвердил наличие статистически значимых корреляций между абиотическими параметрами и распределением таксонов. Например, для *P. uncinatus* и *A. quadrangularis* выявлена положительная корреляция с минерализацией, тогда как *B. (E.) longispina* и *A. elongata* показывают отрицательную корреляцию с pH. Площадь водоема также значимо влияет на распространение таксонов кладоцер: численность *B. (E.) longispina* положительно коррелирует с площадью водоема. Мультипараметрический статистический анализ выявил множество значимых взаимосвязей между абиотическими характеристиками и таксономическим составом сообществ, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к изучению влияния экологических факторов на структуру Cladocera в арктических озерах.

Список литературы / References

- Алекин О. А. (1953) *Основы гидрохимии*. Ленинград, Гидрометеиздат, 296 с. [Alekin O. A. (1953) *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad, Gidrometeizdat, 296 p. (in Russian)]
- Даувальтер В. А., Хлопцева Е. В. (2008) Гидрологические и гидрохимические особенности озер Большеземельской тундры. *Вестник МГТУ*, 11(3): 407–414 [Dauvalter V. A., Khloptseva E. V. (2008) On hydrological and hydrochemical features of lakes of the Bolshezemelskaya Tundra. *Vestnik of MSTU* [Vestnik MGTU], 11(3): 407–414 (in Russian)]
- Дедов А. А. (2006) *Растительность Малоземельской и Тиманской тундр*. Сыктывкар, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 160 с. [Dedov A. A. (2006) *Vegetation of the Malozemelskaya and Timan Tundras*. Syktyvkar, Institute of Biology, Komi Science Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 160 p. (in Russian)]
- Коковкин А. В. (2016) Река Печора. *Материалы «Комплексной Печорской экспедиции»*. *Известия Коми республиканского отделения РГО. Вып. 1(17)*. Лажентцев В. Н., Асхабов А. М. (ред.), П. П. Юхтанов (ред.-составитель) Сыктывкар, Геопринт, с. 7–8 [Kokovkin A. V. (2016) The Pechora River. *Materials of the Complex Pechora Expedition. News of the Komi Republican Branch of the Russian Geographical Society. Issue 1(17)*. Lazhentsev V. N., Askhabov A. M. (Eds.), P. P. Yukhtanov (Editor-compiler) Syktyvkar, Geoprint, p. 7–8 (in Russian)]
- Коровчинский Н. М., Котов А. А., Синёв А. Ю., Неретина А. Н., Гарибян П. Г. (2021) *Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Том 2*. Москва, Товарищество научных изданий КМК, 544 с. [Korovchinskii N. M., Kotov A. A., Sinev A. Yu., Neretina A. N., Garibyan P. G. (2021) *Water fleas (Crustacea: Cladocera) of Northern Eurasia. Volume 2*. Moscow, KMK Scientific Press LTD, 544 p. (in Russian)]
- Котов А. А., Синев А. Ю., Глаголев С. М., Смирнов Н. Н. (2010) Ветвистоусые ракообразные (Cladocera). *Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон*. Алексеев В. Р., Цалолыхин С. Я. (ред.) Москва, Товарищество научных изданий КМК, с. 151–276 [Kotov A. A., Sinev A. Yu., Glagolev S. M., Smirnov N. N. (2010) Cladocera. *Identification Key to freshwater zooplankton and zoobenthos in European Russia. Volume I. Zooplankton*. Alekseev V. R., Calolihin S. Ya. (Eds.) Moscow, KMK Scientific Press, p. 151–276 (in Russian)]
- Левашенко Д. В., Малясова Е. С. (2007) Климатический оптимум голоцена в дельте Печоры. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 4: 125–132 [Levashenko D. V., Malyasova E. S. (2007) The Holocene climate optimum in the Pechora delta. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 4: 125–132 (in Russian)]
- Ливеровский Ю. А. (1933) Геоморфология и четвертичные отложения северных частей Печорского бассейна. *Труды Геоморфологического института АН СССР*, 7: 5–73 [Liverovsky Yu. A. (1933) Geomorphology and quarterly deposits of the northern parts of the Pechora basin. *Proceedings of the Geomorphological Institute AS USSR* [Trudy Geomorfologicheskogo instituta AN SSSR], 7: 5–73 (in Russian)]
- Лукин А. А., Даувальтер В. А., Новоселов А. П. (2000) *Экосистема Печоры в современных условиях*. Апатиты, Издательство Кольского научного центра, 192 с. [Lukin A. A., Dauvalter V. A., Novoselov A. P. (2000) *Ecosystem of the Pechora river in modern conditions*. Apatity, Kola Science Centre, 192 p. (in Russian)]

Любарский Е.Л. (1974) К методике экспресс-квалификации и сравнения описаний фитоценозов. *Количественные методы анализа растительности*. Уфа, БФАН СССР, с. 123–125 [Lyubarsky E.L. (1974) On the method of express-qualification and comparison of phytocoenosis descriptions. *Quantitative methods of vegetation analysis*. Ufa, Bashkir Branch of the USSR Academy of Sciences, p. 123–125 (in Russian)]

Назарова Л.Б., Пестрякова Л.А., Ушницкая Л.А., Хуббертен Х.В. (2008) Индикаторный потенциал хирономид (Diptera: Chironomidae) озер Центральной Якутии для палеоклиматических исследований. *Сибирский экологический журнал*, 15(3): 427–439 [Nazarova L.B., Pestryakova L.A., Ushnitskaya L.A., Hubberten H.-W. (2008) Chironomids (Diptera: Chironomidae) in lakes of central Yakutia and their indicative potential for paleoclimatic research. *Contemporary Problems of Ecology*, 1(3): 335–345]

Нигматуллин Н.М., Нигаматзянова Г.Р., Валиева Э.А., Фролова Л.А. (2021) Рецентные Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) в тафоценозах озер дельты реки Печоры. *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*, 163(3): 527–537 [Nigmatullin N.M., Nigamatzyanova G.R., Valieva E. A., Frolova L. A. (2021) Recent Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) in the taphocenoses of lakes of the Pechora River delta (Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 163(3): 527–537 (in Russian)]

Новичкова А.А. (2016) *Микроракообразные (Cladocera, Copepoda) внутренних водоемов арктических островов и закономерности их распределения в высоких широтах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Москва, 172 с. [Novichkova A.A. (2016) *Microcrustaceans (Cladocera, Copepoda) of inland water bodies on Arctic islands and their high-latitude distribution patterns. Dissertation for the degree of candidate of biological sciences*. Moscow, 172 p. (in Russian)]

Смирнов Н.Н. (1971) *Chydoridae фауны мира. Фауна СССР. Ракообразные*. Ленинград, Наука, 531 с. [Smirnov N.N. (1971) *Chydoridae fauna of the world. Fauna of the USSR. Crustacea*. Leningrad, Nauka, 531 p. (in Russian)]

Смирнов Н.Н. (1978) Методы и некоторые результаты исторической биоценологии ветвистоусых ракообразных. *Экология сообществ озера Глубокого*. Москва, с. 105–173 [Smirnov N.N. (1978) Methods and selected results of historical biocenology of cladocerans. *Ecology of Lake Glubokoe communities*. Moscow, p. 105–173 (in Russian)]

Фролова Л.А. (2011) Ветвистоусые ракообразные (Cladocera Latreille, 1829, Branchiopoda, Crustacea) в палеоэкологических исследованиях. *Методические подходы к использованию биологических индикаторов в палеоэкологии*. Назарова Л.Б. (ред.) Казань, Казанский университет, с. 52–87 [Frolova L. A. (2011) Cladocerans (Cladocera Latreille, 1829, Branchiopoda, Crustacea) in paleoecological studies. *Methodological approaches to the use of biological indicators in paleoecology*. Nazarova L. B. (Ed.) Kazan, Kazan University, p. 52–87 (in Russian)]

Фролова Л.А., Ибрагимова А.Г. (2015) Карцинологический анализ донных отложений озер Километровое и Котово Харбейской системы (Большеземельская тундра). *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*, 5: 5–17 [Frolova L. A., Ibragimova A. G. (2015) Cladocera remains from sediments of Kilometrovoe and Kotovo lakes, Kharbey system (Bolshezemelskaya tundra). *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences* [Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk], 5: 5–17 (in Russian)]

Фефилова Е. Б., Кононова О. Н. (2018) Новые данные по составу зоопланктона дельты реки Печора. *Результаты «Комплексной Печорской экспедиции – 2016»*. *Известия Коми республиканского отделения Русского Географического общества*. Вып. 2(18). Сыктывкар, Геопринт, с. 14–19 [Fefilova E. B., Kononova O. N. (2018) New data on the composition of zooplankton in the Pechora River delta. *Results of the Complex Pechora Expedition-2016. News of the Komi Republican Branch of the Russian Geographical Society*. Issue 2(18). Syktyvkar, Geoprint, p. 14–19 (in Russian)]

Черевичко А. В., Мельник М. М., Прокин А. А., Глотов А. С. (2011) Современное состояние зоопланктона и макрозообентоса низовий р. Печоры (Ненецки АО). *Вода: химия и экология*, 9: 53–59 [Cherevichko A. V., Melnik M. M., Prokin A. A., Glotov A. S. (2011) Current state of zooplankton and macrozoobenthos of Pechora lower reaches (Nenets Autonomous Area). *Water: Chemistry and Ecology* [Voda: khimiya i ekologiya], 9: 53–59 (in Russian)]

Alhonen P. (1972) Gallträsket: The geological development and paleolimnology of a small polluted lake in Southern Finland. *Commentationes Biologicae*, 57: 1–34

Birks H. J. B. (1995) Quantitative palaeoenvironmental reconstructions. *Statistical modelling of quaternary science data*. Maddy D., Brew J. S. (Eds.) Quaternary Research Association, Cambridge, p. 161–254

Błędzki L. A., Rybak J. I. (2016) *Freshwater crustacean zooplankton of Europe: Cladocera and Copepoda (Calanoida, Cyclopoida). Key to species identification, with notes on ecology, distribution, methods and introduction to data analysis*. Germany, Springer, 918 p.

Brittain J. E., Gíslason G. M., Ólafsson J. S., Ponomarev V. I., Aamodt K. O., Bogen J., Brørs S., Jensen A. J., Kochanov S. K., Kokovkin A. V., L'Abée-Lund J. H., Melvold K., Stenina A. S. (2022) Arctic rivers. *Rivers of Europe*. Tockner K., Zarfl C., Robinson C. T. (Eds.) Elsevier, p. 495–546

Davidson T. A., Sayer C. D., Perrow M. R., Bramm M., Jeppesen E. (2007) Are the controls of species composition similar for contemporary and sub-fossil cladoceran assemblages? A study of 39 shallow lakes of contrasting trophic status. *Journal of Paleolimnology*, 38(1): 117–134

Frey D. G. (1960) The ecological significance of cladoceran remains in lake sediments. *Ecology*, 41(4): 684–699

Frey D. G. (1962) Cladocera from the Eemian Interglacial of Denmark. *Journal of Paleolimnology*, 36(6): 1133–1154

Frey D. G. (1964) Remains of animals in Quaternary lake and bog sediments and their interpretation. *Archiv für Hydrobiologie*, 2: 1–116

Frey D. G. (1986) Cladocera analysis. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. Berglund B. E. (Ed.) Chichester, John Wiley & Sons Ltd., p. 667–701

Frey D. G. (1988) Littoral and offshore communities of diatoms, cladocerans and dipterous larvae, and their interpretation in paleolimnology. *Journal of Paleolimnology*, 1(3): 179–191

Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L., Herzsuh U. (2014) Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables. *Journal of Paleolimnology*, 52(1–2): 107–119

Frolova L. A., Ibragimova A., Fedorova I. (2016) Stratigraphy of Cladocera in a core from a Yamal Peninsula Lake (Arctic Russia). *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016*, 2: 579–585

- Frolova L., Frolova A. (2017) Implification of ephippium analysis (Cladocera, Branchiopoda, Crustacea) for reconstruction of past environmental changes in Central Yakutia, Russia. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017*, 17: 481–486
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. (2018) Paleolimnological studies of tundra lakes in the Pechora delta (Nenets Autonomous Region, Russia). *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*, 18: 621–627
- Frolova L. A. (2018) Cladocera from bottom deposits as an indicator of changes in climate and ecological conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 107: 012084
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. (2019a) First record of *Phreatolona Protzi* (Hartwig, 1900) (Branchiopoda: Anomopoda) in the tundra lake in north-east European Russia. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*, 19: 285–290
- Frolova L. A., Nigmatullin N. M., Frolova A. A., Nazarova L. B. (2019b) Findings of *Phreatolona protzi* (Hartwig, 1900) (Cladocera: Anomopoda: Chydoridae) in Russia. *Invertebrate Zoology*, 16(2): 200–210
- Goulden C. E. (1969) Interpretative studies of cladoceran microfossils in lake sediments. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen*, 17(1): 43–55
- Hann B. J. (1989) Methods in Quaternary Ecology #6. Cladocera. *Geoscience Canada*, 16(1): 17–26
- Ibragimova A. G., Frolova L. A., Grekov I. M. (2016) Results of subfossil Cladocera (Branchiopoda, Crustacea) analyses from bottom deposits of Lake Antyukh-Lambina (Kola Peninsula, Murmansk region). *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 7(6): 3201–3206
- Korhola A., Rautio M. (2001) Cladocera and other branchiopod crustaceans. *Tracking environmental change using lake sediments. Volume 4. Zoological indicators*. Smol J. P., Birks H. J. B., Last W. M. (Eds.) Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 5–41
- Lavrinenko I. A., Sadyrin V. M. (2000) General landscape and climate. *Pechora Delta. Structure and dynamics of the Pechora Delta ecosystems (1995–1999)*. Van Eerden M. R. (Ed.) Lelystad, Henk Bos, RIZA, p. 21–35
- Leps J., Smilauer P. (2003) *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. Cambridge University Press, New York, 283 p.
- Lotter A. F., Birks H. J. B., Hofmann W., Marchetto A. (1997) Modern diatom, Cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. I. Climate. *Journal of Paleolimnology*, 18(4): 395–420
- Nazarova L., Herzsuh U., Wetterich S., Kumke T., Pestryakova L. (2011) Chironomid-based inference models for estimating mean July air temperature and water depth from lakes in Yakutia, northeastern Russia. *Journal of Paleolimnology*, 45(1): 57–71
- Nazarova L., Lüpfert H., Subetto D., Pestryakova L., Diekmann B. (2013) Holocene climate conditions in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from sediment composition and fossil chironomids of Lake Temje. *Quaternary International*, 290–291: 264–274
- Nevalainen L., Luoto T. P. (2010) Temperature sensitivity of gamogenesis in littoral cladocerans and its ecological implications. *Journal of Limnology*, 69(1): 120–125
- Nevalainen L., Luoto T. P., Sarmaja-Korjonen K. (2008) Late Holocene water-level changes in lake Iso Lehmälampi, Southern Finland, reflected in subfossil cladocerans and chironomids. *Studia Quaternaria*, 25: 33–42

- Nigmatullin N., Frolova L. (2019) Zooplankton community structure and environmental conditions of tundra lakes in the Pechora River Delta (Northern Russia). *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*, 19: 817–824
- Nigamatzyanova G., Frolova L., Nigmatullin N., Valieva E. (2020) Vegetation and climate changes in the northeast European Russia (Nenets Autonomous Okrug, Russia). *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*, 20: 547–552
- Panchenko E., Krylenko I., Alabyan A. (2024) Tide-river interaction in the Pechora Delta as revealed by new measurements and numerical modeling. *Anthropocene Coasts*, 7(1): 27
- Rautio M. (1998) Community structure of crustacean zooplankton in subarctic ponds – effects of altitude and physical heterogeneity. *Ecography*, 21(3): 327–335
- Rautio M. (2007) The use of Cladocera in paleolimnology. *Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elias S. A. (Ed.) Amsterdam, Elsevier, p. 2031–2039
- Sadyrin V.M. (2000) Zooplankton. *Pechora Delta. Structure and dynamics of the Pechora Delta ecosystems (1995–1999)*. Van Eerden M. R. (Ed.) Lelystad, Henk Bos, RIZA, p. 115–119
- Sarmaja-Korjonen K. (2002) Multi-proxy data from Kaksoislahti Lake in Finland: dramatic changes in the late Holocene cladoceran assemblages. *Journal of Paleolimnology*, 28(3): 287–296
- Smol J. P., Wolfe A. P., Birks H. J. B., Douglas M. S. V., Jones V. J., Korhola A., Pienitz R., Rühland K., Sorvari S., Antoniades D., Brooks S. J., Fallu M.-A., Hughes M., Keatley B. E., Laing T. E., Michelutti N., Nazarova L., Nyman M., Paterson A. M., Perren B., Quinlan R., Rautio M., Saulnier-Talbot E., Siitonen S., Solovieva N., Weckström J. (2005) Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(12): 4397–4402
- Spearman C. (1904) The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1): 72–101
- Sweetman J. N., Rühland K. M., Smol J. P. (2010) Environmental and spatial factors influencing the distribution of cladocerans in lakes across the central Canadian Arctic treeline region. *Journal of Limnology*, 69(1): 76–87
- Szeroczyńska K. (2016) Long term subfossil Cladocera record from the partly varved sediment of Lake Tiefer See (NE Germany). *Advances in Oceanography and Limnology*, 7(2): 184–196
- Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. (2007) *Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe*. Friends of the Lower Vistula Society, 84 p.
- ter Braak C. J. F., Prentice I. C. (1988) A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 18: 271–317
- ter Braak C. J. F., Šmilauer P. (2002) *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows, User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*. Ithaca, NY, Microcomputer Power, 500 p.
- Van der Sluis T., Degteva S. V., Pedroli G. B. M. (2003) The Pechora River (Russia): Reference system for Northwest European Rivers? *International conference «Towards natural flood reduction strategies»*. Warsaw, p. 1–7

EDN: LVXPRU

УДК 551.89

Reconstruction of Final Late Pleistocene and Holocene Paleogeographic Conditions in the Middle Yenisei Valley Based on a Comprehensive Analysis of Sediments from the First Floodplain Terrace of the Berezovka River

**Natalya Yu. Zharinova*,
Galina Yu. Yamskikh and Darya E. Makarchuk**

*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 30.03.2025, received in revised form 13.08.2025, accepted 2.09.2025

Abstract. The present study reports the reconstruction of paleogeographic conditions of the final late Pleistocene and Holocene in the Middle Yenisei Valley. This research is based on a thorough examination of continuously deposited sediments from the first floodplain terrace of the Berezovka River, employing pedological, malacofaunal, geochemical, and radiocarbon dating analyses. Continuous sedimentation of the first floodplain terrace of the Berezovka River began 13,340±410 calibrated years before present (cal BP), during stabilization of the hydrological regime of the river. Accumulation of basal horizons of gray-blue clay deposits and sandy deposits of channel alluvium occurred 20,830±520 cal BP, and it was caused by floods and freshets on the Yenisei River. During the late Pleistocene, a shift occurred from dry and cold conditions (20,830±520 cal BP) to a more humid and temperate climate (13,340±410 cal BP). The early Holocene, 8,805±200 cal BP, was marked by a combination of arid and cold climatic conditions. Notably, that era witnessed a rise in the diversity of freshwater mollusk species within the malacofaunal community. During the mid-Holocene (about 5,230±250 cal BP) and the late Holocene period (1,020±220 cal BP), there was an increase in humidity and climate warming, as confirmed by an increase in the number of shells of terrestrial species in the structure of the malacofaunal community. At the end of the late Holocene (220±70 cal BP), the climate became similar to the modern one. Geochemical markers such as Sr/Ba, Cu, Co, Cr, and Zn ratios reveal a transition in climate during the late Pleistocene, from a dry and cold environment to a more

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: nata_1986@bk.ru

ORCID: 0000-0001-6544-8584 (Zharinova N.); 0000-0002-2289-5285 (Yamskikh G.); 0000-0002-5629-3450 (Makarchuk D.)

humid and warmer one. In the Holocene epoch, the data obtained suggest a change from arid and cold conditions (early Holocene) to the present-day climate, without a distinct indication of the Holocene climatic optimum or the subsequent cooling observed in the neighboring regions.

Keywords: geochemistry of sediments, paleomalacological assemblages, radiocarbon dating, late Pleistocene, Holocene, Berezovka River Valley, Krasnoyarsk depression.

Acknowledgements. The authors are grateful to Evgeny Viktorovich Kerber, leading engineer at the A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk) for assistance in creating an age model of the Berezovka section.

Citation: Zharinova N. Yu., Yamskikh G. Yu., Makarchuk D. E. Reconstruction of final late Pleistocene and Holocene paleogeographic conditions in the Middle Yenisei Valley based on a comprehensive analysis of sediments from the first floodplain terrace of the Berezovka River. J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 365–388. EDN: LVXPRU



Реконструкция палеогеографических условий финала позднего плейстоцена и голоцена в долине Среднего Енисея на основе комплексного анализа отложений первой надпойменной террасы р. Березовка

Н. Ю. Жаринова, Г. Ю. Ямских, Д. Е. Макаrchук
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В статье представлены результаты реконструкции палеогеографических условий финала плейстоцена и голоцена в долине Среднего Енисея на основе комплексного изучения непрерывного седиментационного разреза первой надпойменной террасы реки Березовка с использованием малакофаунистического, педологического, геохимического и радиоуглеродного анализов. Непрерывное осадконакопление отложений в разрезе началось 13340 ± 410 калиброванных лет назад (кал.л.н.) в условиях стабилизации гидрологического режима реки. Накопление базальных горизонтов глинистых отложений серо-голубого цвета и песчаных отложений руслового аллювия произошло 20830 ± 520 кал.л.н. под влиянием паводков и половодий на р. Енисей. В позднем плейстоцене реконструирована смена сухих и холодных климатических условий (20830 ± 520 кал.л.н.) на влажные и более теплые (13340 ± 410 кал.л.н.). Раннеголоценовое время (8805 ± 200 кал.л.н.) характеризуется существованием аридных и холодных климатических условий и отличается увеличением видового разнообразия пресноводных моллюсков в структуре малакофаунистического сообщества. В среднем голоцене (5230 ± 250 кал.л.н.) и позднем голоцене (1020 ± 220 кал.л.н.) климат стал

влажнее и теплее, что подтверждается увеличением количества раковин наземных видов в структуре малакофаунистического сообщества. В конце позднего голоцена (220 ± 70 кал.л.н.) климат стал близок к современному. Значения геохимических индикаторов Sr/Ba, Cu, Co, Cr, Zn свидетельствуют об изменении климатических условий в позднем плейстоцене от сухих и холодных к более влажным и теплым; в голоцене – от аридных и холодных (ранний голоцен) к современным без четкого проявления климатического оптимума голоцена и похолоданий, реконструированных в соседних регионах.

Ключевые слова: геохимия отложений, палеомалакологические комплексы, радиоуглеродное датирование, поздний плейстоцен, голоцен, долина р. Березовка, Красноярская котловина.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность Керберу Евгению Викторовичу, ведущему инженеру Института геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) за работу с возрастной моделью разреза Березовка.

Цитирование: Жаринова Н.Ю. Реконструкция палеогеографических условий финала позднего плейстоцена и голоцена в долине Среднего Енисея на основе комплексного анализа отложений первой надпойменной террасы р. Березовка / Н. Ю. Жаринова, Г. Ю. Ямских, Д. Е. Макачук // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 365–388. EDN: LVXPRU

Введение

Террасовые отложения являются результатом сочетания геологических, гидрологических, геоморфологических и почвообразовательных процессов, что делает их уникальными природными образованиями. Изучение разрезов отложений в долинах рек представляет собой актуальную задачу как с фундаментально-научной, так и с практической точки зрения. Это обусловлено тем, что хозяйственная деятельность человека преимущественно сосредоточена в бассейнах рек. Формирующиеся здесь аллювиальные почвы выполняют важнейшие биосферные функции: представляют собой среду обитания для наземных организмов, способствуют дифференциации географической оболочки и биосферы, а также играют важную роль в процессе биологической эволюции (Шиманская, Позняк, 2016). Почвы играют критически важную роль, функционируя как связующее звено между биосферой, литосферой и гидросферой. Занимая промежуточное

положение на стыке этих сфер, они активно участвуют в круговороте веществ. Гидроморфные почвы, формирующиеся в транзитных условиях либо в условиях аккумуляции, выполняют функцию геохимического барьера, регулируя миграцию различных соединений (Молчанова и др., 2003) и тем самым существенно влияя на биологический и геологический круговороты.

В европейской части России, Западной Сибири и за рубежом активно ведутся исследования, направленные на изучение гидрологического режима рек, процессов накопления отложений (седиментации), геохимических характеристик их состава и реконструкцию окружающей среды на основе анализа аллювиальных отложений (Waters, Nordt, 1995; Liu et al., 1996; Gocht et al., 2001; Berner et al., 2012; Keen-Zebert et al., 2013; Matys Grygar et al., 2014; Olszak et al., 2019; Budko et al., 2020; Chen et al., 2020; Lombardi et al., 2020; Sheinkman et al., 2021; Vandenberghe et al., 2021). Однако несмотря на значимость таких

исследований террасовые и пойменные отложения, в том числе и на территории Красноярской котловины, изучены недостаточно. Целью настоящего исследования является реконструкция палеогеографических условий голоцена на основе изучения террасовых отложений Красноярской котловины, накопление которых происходило непрерывно в позднелейстоцен-голоценовое время.

Район исследования

Район нашего исследования расположен на стыке Восточного Саяна, Западно-Сибирской равнины и Среднесибирского плоскогорья, на территории Красноярской котловины в долине реки Березовка (рис. 1а) и характеризуется лесостепными ландшафтами (Пармузин, 1964; Ямских, 1993; Ямских, 2022). Согласно классификации котловин, предложенной Н.В. Фадеевой (1996), Красноярская котловина относится к типу открытых (окологорных) котловин.

Река Енисей с её главными притоками (Базаиха, Кача, Есауловка, Берёзовка, Карaulьная, Бузим и др.) представляют основу гидрографической сети Красноярской котловины (рис. 1б). Бассейн реки Енисей в пределах котловины имеет сложное геоморфологическое строение. В отложениях террас рек и пойм запечатлены изменяющиеся палеогеографические условия позднелейстоцен-голоценового времени. В пределах Красноярской котловины А.Ф. Ямских (1992) выделял девять террас, которые были сгруппированы в три комплекса по структурно-морфологическим особенностям. Это высокоуровневый комплекс (включая террасы на 120–135 (150), 90–120 и 60–80 м), средний (35–55 м) и нижний (24–30, 15–18, 10–14, 7–10 м). Временем начала формирования поймы считается 6–4 тысяч лет назад (Ямских, 1993; Yamskikh, 1996; Yamskikh et al., 1999).

В геологическом отношении территория Красноярской котловины включает в себя часть салаирских складчатых сооружений Восточного Саяна, структуры девонской Рыбинской и юрской Чулымо-Енисейской впадин. На территории развиты отложения верхнего протерозоя (риффея и венда), кембрия, девона, карбона, юры и четвертичный комплекс (рис. 1с). Данные отложения представлены разнообразными осадочными породами, которые содержат останки животных и растений. На юго-востоке Красноярской котловины расположены северо-западные отроги Восточного Саяна, они образованы интрузиями сиенитов и интенсивно дислоцированными осадочными образованиями кембрийского периода. С точки зрения тектоники Красноярская котловина представляет собой регион, где пересекаются различные по своему составу и возрасту тектонические структуры. На юге расположена Алтайско-Саянская палеозойская складчатая область, на северо-западе и севере – Западно-Сибирская эпипалеозойская плита, а на северо-востоке и востоке находится докембрийская Сибирская платформа (Сазонов и др., 2011; Махлаев и др., 2012).

Резко континентальный климат Красноярской котловины характеризуется продолжительной и морозной зимой и жарким, иногда засушливым, коротким летом. Средняя январская температура равна -15°C , средняя июльская $+18^{\circ}\text{C}$. Среднегодовая температура воздуха колеблется в пределах $0,5-0,6^{\circ}\text{C}$. Безморозный период составляет от 108 до 115 дней. Годовая сумма осадков составляет приблизительно 400 мм, из которых 218 мм выпадает в тёплый период года.

Растительный покров Красноярской котловины характеризуется разнообразием. Степная растительность распространена на платообразных повышениях, террасах Енисея и южных, юго-западных склонах воз-

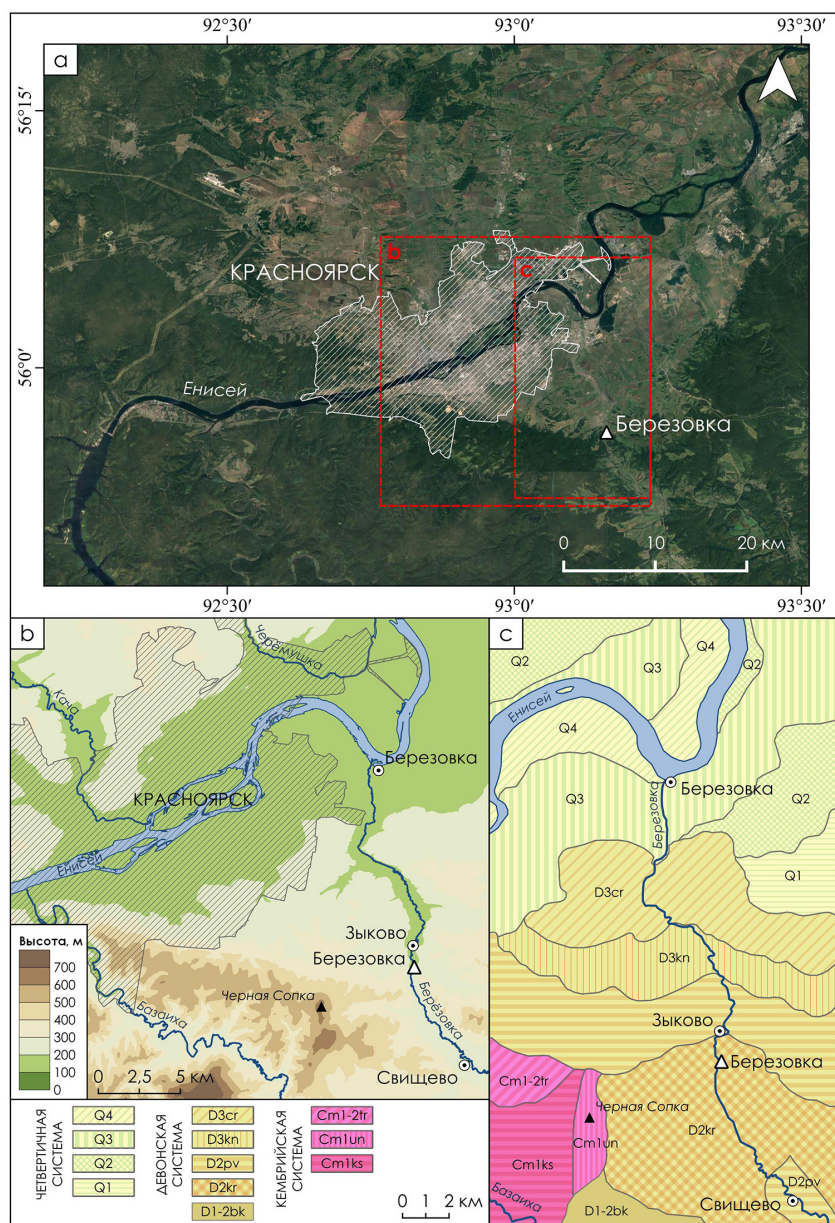


Рис. 1. а – местоположение разреза Березовка, б – топографическая модель территории исследования, с – геологическая карта территории исследования; **Кембрийская система:** Sm₁ks – Койская свита. Конгломераты, песчаники, кварциты, граувакковые песчаники, известковые и известково-глинистые сланцы, известняки, доломиты; Sm₁un – Унгутская свита. Доломиты, доломитизированные известняки, известняки, конгломераты; Sm₁₋₂tr – Нижний и средний отделы нерасчлененные. Торгашинская свита. Известняки, доломиты. **Девонская система:** D₁₋₂bk – Нижний и средний отделы нерасчлененные. Быскарская серия. Порфириды, диабазы, ортофиры и их туфы. Конгломераты, песчаники, алевролиты, мергели; D₂kr – Карымовская свита. Крупногалечные конгломераты, песчаники, алевролиты. Покровы миндалефиров; D₂pv – Павловская свита. Конгломераты, песчаники, алевролиты, известняки с халцедоном; D₃kn – Кунгусская свита. Песчаники, мергели, алевролиты; D₃cr – Чаргинская свита. Песчаники кварцевые, алевролиты, мергели, известняки с халцедоном. **Четвертичная система:** Q₁ – Нижний отдел. Аллювиальные галечники, суглинки (VII терраса реки Енисей); Q₂ – Средний отдел. Аллювиальные галечники, пески, суглинки (IV–VI террасы реки Енисей); Q₃ – Верхний отдел. Аллювиальные галечники, суглинки (I–III террасы реки Енисей); Q₄ – Современный отдел. Аллювиальные пески, галечники надпойменных террас реки Енисей и его притоков.

Источник: а – фрагмент космического снимка Google Earth (Google Earth // URL: https://earth.google.com/web/@56.01882414,92.89383458,139.56166361a,33222.97711022d,35y,0h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I_____AAAA (дата обращения 25.07.2024)), б – на основе SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), с – составлено ассистентом кафедры географии СФУ И. А. Вайсбротом на основе Жуйко и др. (1959)

Fig. 1. а – Location of the Berezovka-1 (IV) section; б – Topographic model of the study area; в – Geological map of the study area; **Cambrian system:** Cm₁ks – Koyskaya formation. Conglomerates, sandstones, quartzites, Grauvak sandstones, lime and lime-clay shales, limestones, dolomites; Cm₁un – Ungutskaya formation. Dolomites, dolomitic limestones, limestones, conglomerates; Cm₁₋₂tr – Lower and middle sections, undivided. Torgashinskaya formation. Limestone and dolomites. **Devon system:** D₁₋₂bk – Lower and middle sections, undivided. Byskarskaya series. Porphyrites, diabases, orthophyrs, and their tuffs. Conglomerates, sandstones, aleurolites, marls; D₂kr – Karymovskaya formation. Large-peeled conglomerates, sandstones, aleurolites. Amygdalefir coverings; D₂pv – Pavlovskaya formation. Conglomerates, sandstones, aleurolites, limestones with chalcedony; D₃kn – Kungusskaya formation. Sandstones, marls, aleurolites; D₃cr – Chargininskaya formation. Quartz sandstones, aleurolites, marls, limestones with chalcedony. **Quaternary system:** Q₁ – Lower section. Alluvial loams, sands, and pebbles (terrace VII of the Yenisei River); Q₂ – Middle section. Alluvial sands, pebbles, and loams (terraces IV–VI of the Yenisei River); Q₃ – Upper section. Alluvial sands and pebbles (terraces I–III of Yenisei River); Q₄ – Modern sections. Alluvial sands and pebbles of the floodplain terraces of the Yenisei River and its tributaries.

Source: а – on the Google Earth satellite image Google Earth // URL: https://earth.google.com/web/@56.01882414,92.89383458,139.56166361a,33222.97711022d,35y,0h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I_____AAAA (access date 25.07.2024); б – based on the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM); в – compiled by Assistant of SFU Geography Department I. A. Weisbrot based on Zhuiko et al. (1959)

вышенностей. Остепненные луга занимают участки речных долин и островов, не подверженные затоплению, а также склоны южной и юго-западной экспозиции. Северные склоны возвышенностей характеризуются сосново-березовыми лесами. В долинах рек встречаются острова с ивой, тополями, редко сосной и березой. В поймах рек с избыточным увлажнением почвы развивается болотная растительность.

В лесостепных зонах преобладают выщелоченные черноземы, в меньшей степени встречаются черноземы оподзоленные – преимущественно в пониженных участках. В степных районах доминируют черноземы обыкновенные, реже – южные. Черноземные почвы развиваются на террасах реки Енисей. Темно-серые, серые и светло-серые лесные почвы развиваются на северных склонах возвышенностей под березовыми лесами, перелесками и на полянах (запад и северо-запад) (Егоров и др., 1977; Кириллов, 1988). Из числа интразональных почв в Красноярской лесостепи формируются болотные, луговые, лугово-

черноземные, пойменные и скелетные почвы (Шпедт и др., 2015).

Объектом нашего исследования является разрез Березовка, который располагается на первой надпойменной террасе правого берега реки Березовка (правого притока реки Енисей). Точка заложения разреза находится в 19,2 км от устья реки, высота над уровнем моря 205 м (рис. 1, 2). Исток р. Березовка в отрогах Восточного Саяна, длина около 64 километров. В долине реки сформирована пойма шириной около 10–50 м., на некоторых участках сохранились низкие террасы. На низких террасах преобладает луговая растительность с доминированием злаковых и клевера. Также встречаются ивы (Жаринова, 2011).

Материалы и методы

В процессе полевых исследований был проведен детальный макроморфологический анализ разреза в соответствии с общепринятой методикой полевого изучения почв и отложений. Отбор проб осуществлялся согласно рекомендациям (Иванов, Демкин,



Рис. 2. Общий вид долины р. Березовка в месте заложения разреза Березовка

Fig. 2. View of the Berezovka River valley near the location of the Berezovka section

1996). В лабораторных условиях были определены: гранулометрический состав почв и отложений методом пипетки в стоячей воде по варианту Н. А. Качинского (Шеин, 2009); содержание общего органического углерода (гумуса) путем мокрого сжигания согласно методу И. В. Тюрина (Пономарева, Плотнокова, 1980); количественный анализ содержания карбонатов с использованием обменного (ацидиметрического) метода (Аринушкина, 1970).

Элементный состав образцов (оптическая эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой) был определен в Государственной высшей школе имени Папы Иоанна Павла II в Бяла-Подляске (Польша). Образцы минерализовали в закрытом тefлоновом сосуде с х/ч хлорной и азотной кислотами (3:1) в микроволновой печи Anton Paar Multiwave PRO под контролем давления. После разбавления до 50 мл образцы анализировали с помощью спектрометра SpectroBlue ICP-OES. Поток аргона: поток охлаждающей жидкости

12 л/мин; вспомогательный поток 0,90 л/мин; поток распылителя 0,78 л/мин. Всего было проведено три измерения; скорость насоса составляла 30 об/мин. Калибровка проводилась с использованием Bernd Kraft Der Standard Spectro Genesis ICAL и VHG SM68–1–500 Element Multi Standard 1 в 5 % HNO_3 .

Микроскопические исследования минералов проводились с использованием SEM Tescan Vega III SBH с ЭДС Oxford X-Act в НИИ «Норникель», СФУ, Красноярск, Россия. Условия анализа были следующими: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток пучка 1,2 нА, время измерения 120 с.

Отбор образцов и извлечение раковин моллюсков проводились в соответствии с общепринятыми методиками (Ložek, 1964; Alexandrowicz, Alexandrowicz, 2011). С целью проведения детальных реконструкций образцы объемом 8 дм^3 отбирались через каждые 5 см от подошвы до кровли разреза с учетом границ стратиграфических горизонтов, промывание образцов производилось в ситах с размером ячеек 0,25–0,5 мм. На основе диагностических признаков строения, формы, скульптуры раковин и морфометрических параметров (Лихарев, Раммельмейер, 1952; Шилейко, 1984; Санько, 2007; Андреева и др., 2010; Лебедева, 2011) под бинокулярным микроскопом устанавливалось систематическое положение найденных раковин.

Для определения экологических требований к условиям обитания выявленных видов использовались классификации четвертичной малакофауны (Ložek, 1964; Piechocki, 1979; Санько, 2000 и др.). Критерием выделения экологических групп служило процентное содержание раковин каждого индикационного таксона относительно их общего количества в образце. Обработка данных по таксономическому составу, изменению обилия моллюсков по разрезу отложений

и соотношению экологических групп проводилась средствами программного пакета C2 (версия 1.8).

Радиоуглеродный анализ образцов осуществлялся специалистами Лаборатории изотопных исследований в Российском государственном педагогическом университете им. А.И. Герцена. Даты представлены в калиброванных годах до настоящего времени (BP; 0 уг BP = 1950 AD), использовались значения 95,4 % вероятности. В пределах 68,3 % вероятности калибрована дата, отражающая наиболее поздний (современный) период почвообразования. Возрастная модель построена с помощью пакета Bacon (Blaauw, Christen, 2011; <https://CRAN.R-project.org/package=rbacon>) в программной среде R (R Core Team, 2020) и с использованием калибровочной кривой IntCal20 (Reimer et al., 2020) (рис. 3).

Результаты

Время формирования разреза р. Березовка относится к позднему плейстоцену и голоцену, в ходе радиоуглеродного анализа получена датировка начала накопления отложений – 20830 ± 520 калиброванных лет назад (кал.л.н.) (рис. 3).

Физико-химические свойства

и гранулометрический состав отложений

Позднеплейстоценовые отложения (20830 ± 520 кал.л.н.) (глубина 2,65–2,7 м) представлены светло-бурым тяжелым суглинком со следами оглеения (рис. 4), нижняя граница которых соответствует уровню нахождения карбонатов (обнаруживаются по реакции отложений с 10-% соляной кислотой). Возраст отложений на глубине 2,45–2,5 м соответствует позднеледниковой стадии плейстоцена (13340 ± 410 кал.л.н.), а осадки имеют схожие свойства с описан-

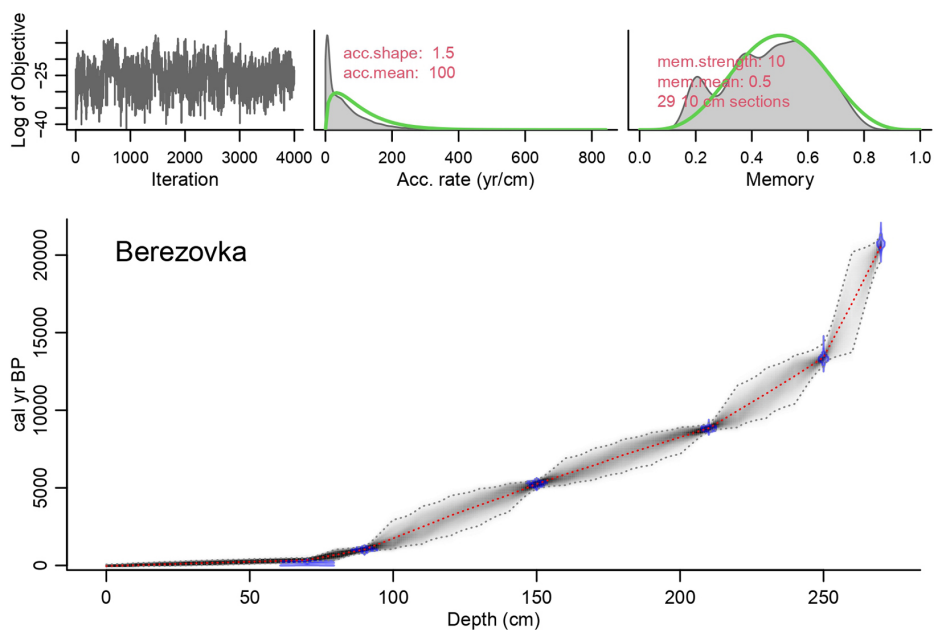


Рис. 3. Возрастная модель разреза Березовка

Fig. 3. Age model of the Berezovka section

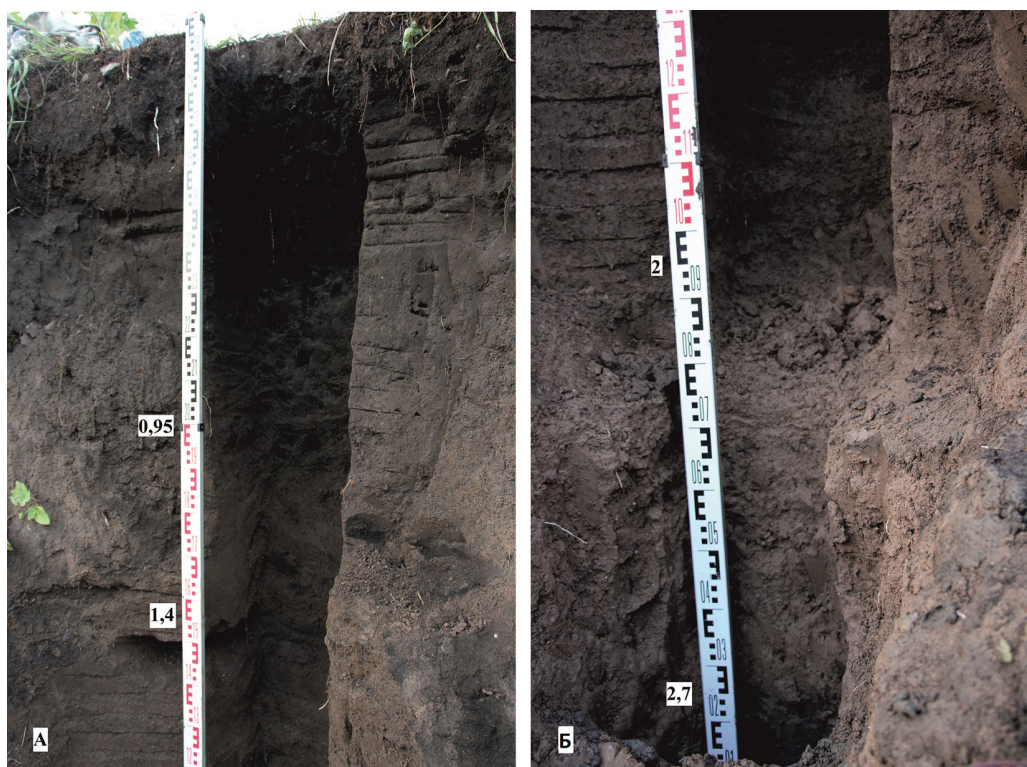


Рис. 4. Отложения первой надпойменной террасы разреза Березовка: (А) верхняя часть разреза, (Б) нижняя часть разреза

Fig. 4. First floodplain terrace sediments of the Berezovka section: (A) upper and (B) lower parts

ными выше. На глубине 2,05–2,1 м фиксируются отложения темного тяжелого суглинка со следами слабого оглеения, имеющие калиброванный возраст – 8805 ± 200 кал.л.н. (конец раннего голоцена – Walker et al., 2012), которые совпадают с нижней границей локального повышения содержания гумуса до 3,4 % (рис. 5). Между данными горизонтами на глубине 2,0–2,4 м отмечены максимальные значения содержания карбонатов (3,9 %) (рис. 5). Установлено, что слой отложений 1,45–1,5 м относится к тяжелому суглинку с повышенным содержанием карбонатов (2,3 %), проявленных в виде белесого карбонатного налета на фоне общего бурого

цвета, и сформировался в среднем голоцене (5230 ± 250 кал.л.н.).

Отложения перекрыты современной аллювиальной темногоумусовой гидроморфизованной почвой (Шишов и др., 2004) мощностью около 140 см и возрастом 1020 ± 220 кал.л.н. (0,85–0,9 м), 220 ± 70 кал.л.н. (0,65–0,7 м). Развитые процессы гумусообразования и гумусонакопления диагностируются на основании макроморфологического исследования и подтверждаются значениями содержания гумуса (очень высокое – до 15,9 % – в гумусово-аккумулятивном горизонте) (рис. 5). Глеевый процесс определяется как слабо развитый по наличию серо-

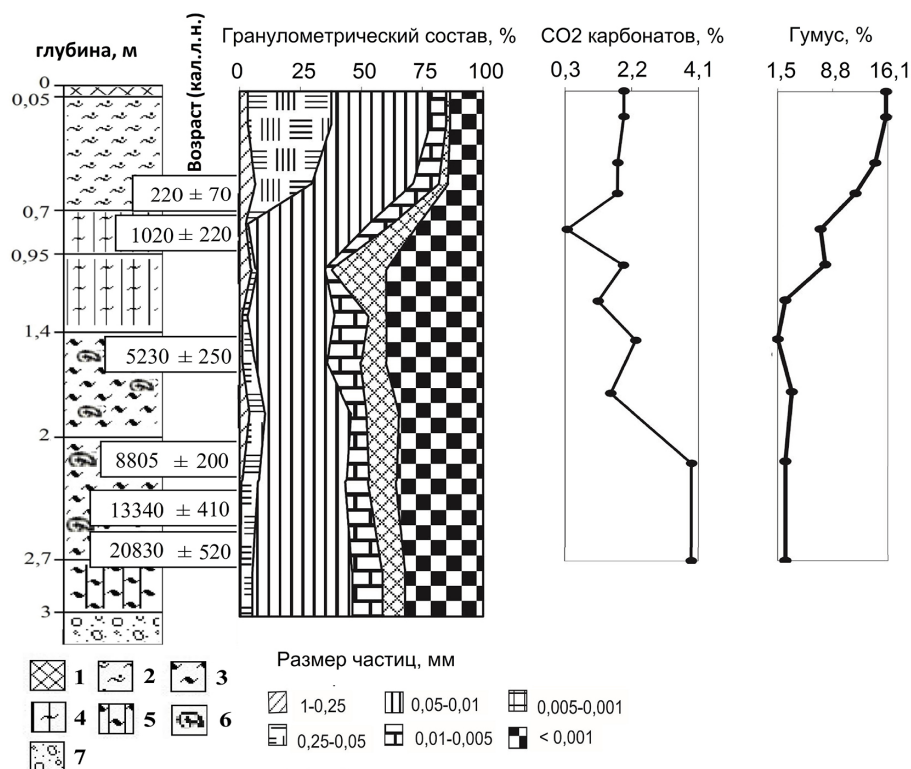


Рис. 5. Гранулометрический состав, распределение CO₂ карбонатов и общего органического углерода гумуса в разрезе Березовка. Условные обозначения: 1 – дернина, 2 – суглинок легкий, 3 – суглинок тяжелый, 4 – глина, 5 – глина серо-голубого цвета, 6 – раковины моллюсков, 7 – песчано-галечные отложения

Fig. 5. Grain-size composition, distribution of CO₂ of carbonates and total organic carbon (TOC) in the Berezovka section. Legend: 1 – soil; 2 – light clay loam; 3 – heavy clay loam; 4 – clay; 5 – greyish blue clay; 6 – mollusk shells; 7 – sandy-pebble sediments

голубой, в меньшей степени оливковой окраске и проявлению новообразований оксидов железа в нижних горизонтах. Отсутствие выраженной слоистости с резкими переходами и прослоек не затронутого почвообразованием минерального материала свидетельствует о доминировании почвообразовательного процесса над аллювиальным. По гранулометрическому составу отложения изменяются от легкосуглинистых до глин легких, на глубине 69–137 см – в средней части разреза – заметно повышенное содержание физической глины. Смена горизонтов происходит постепенно.

Геохимические показатели

К макроэлементам изученного разреза относятся Al (4,3 %), Fe (3,6 %), Ca (2,4 %), Mg (1,1 %), K (0,5 %), Na (0,1 %), P (0,1 %), Mn (0,08 %). Однако, согласно А.И. Перельману

(Перельман, Касимов, 1999; Алексеенко и др., 2018), в качестве порогового значения при разделении элементов на макро- и микро-предложено брать значение $1 \cdot 10^{-2}$ %. Таким образом, для изученного разреза макроэлементами будут также являться рубидий (0,05 %), барий (0,02 %), ванадий (0,02 %), уран (0,02 %), стронций (0,013 %), празеодим (0,011 %). Остальные определенные элементы будут относиться к микроэлементам. Их среднее содержание по профилю изменяется от 0,01 до 0,0001 %. Содержание еще двух определяемых при анализе элементов (Yb и Se) оказалось ниже чувствительности прибора в 10^{-8} % и установлено не было (рис. 6, 7).

Накопление элементов в разрезе относительно глобального фона оценено на основе расчетов коэффициентов концентрации (Кк) – отношения средних по профилю содержаний элементов к кларкам земной коры (Виногра-

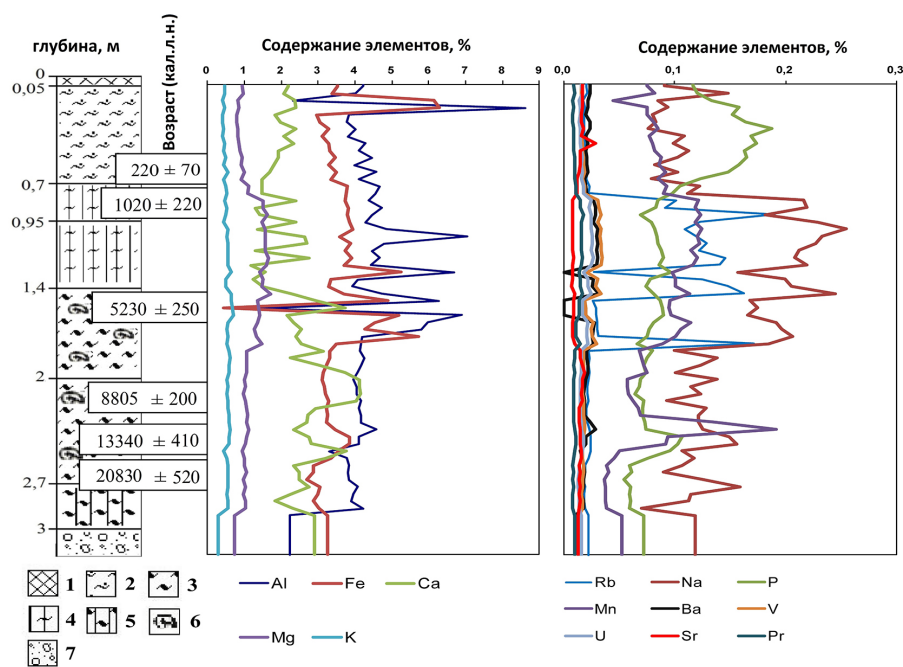


Рис. 6. Распределение макроэлементов (мас.%) в разрезе Березовка. Условные обозначения: 1 – дернина, 2 – суглинок легкий, 3 – суглинок тяжелый, 4 – глина, 5 – глина серо-голубого цвета, 6 – раковины моллюсков, 7 – песчано-галечные отложения

Fig. 6. Major element distribution (mass%) in the Berezovka section. Legend: 1 – soil; 2 – light clay loam; 3 – heavy clay loam; 4 – clay; 5 – greyish blue clay; 6 – mollusk shells; 7 – sandy-pebble sediments

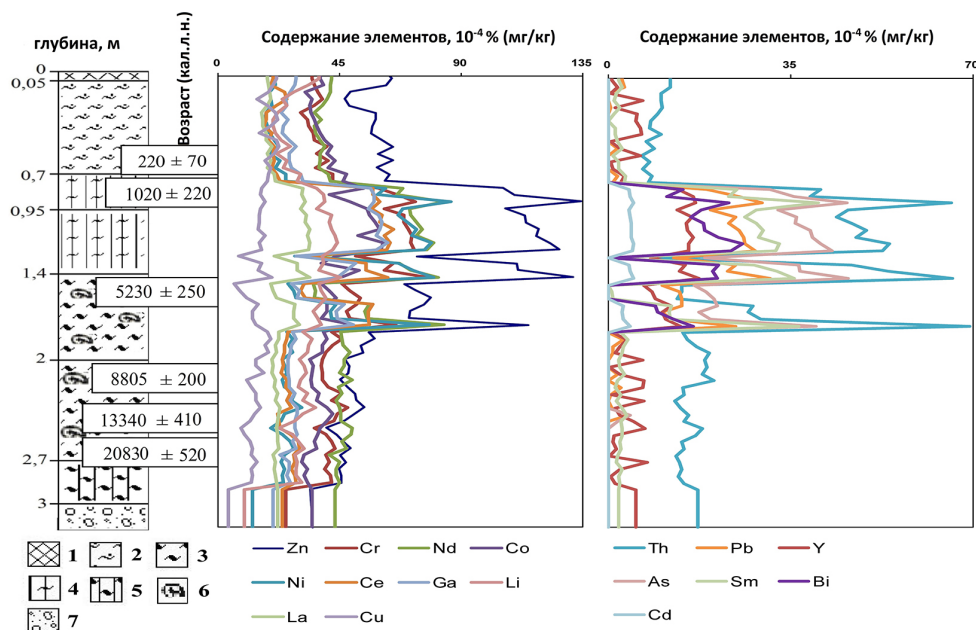


Рис. 7. Распределение микроэлементов (10^{-4} мас.% (мг/кг)) в разрезе Березовка. Условные обозначения: 1 – дернина, 2 – суглинок легкий, 3 – суглинок тяжелый, 4 – глина, 5 – глина серо-голубого цвета, 6 – раковины моллюсков, 7 – песчано-галечные отложения

Fig. 7. Trace element distribution (10^{-4} mass% (mg/kg)) in the Berezovka section. Legend: 1 – soil; 2 – light clay loam; 3 – heavy clay loam; 4 – clay; 5 – greyish blue clay; 6 – mollusk shells; 7 – sandy-pebble sediments

дов, 1962; Алексеев, Алексеев, 2013). Можно выделить следующие по концентрации элементы со значениями, превышающими 1: Bi (Кк=1943), U (Кк=70), Cd (Кк=31), As (Кк=17), Pr (Кк=12), Rb (Кк=3), V (Кк=2), Co (Кк=2), Ga (Кк=2), Th (Кк=2) и Sm (Кк=1,2). Величины коэффициентов для элементов Bi, U, Cd, As, Pr являются высокими и чрезвычайно высокими, вероятным объяснением чему является антропогенное воздействие. Наиболее выделяется значение Кк для Bi, содержание которого в разрезе превышает кларк земной коры на несколько порядков.

Висмут относится к наиболее слабо изученным элементам земной коры. По разным оценкам, его кларк отличается в 19 раз (по Виноградову А.П. – $9 \cdot 10^{-7}$ %, по С.Р. Тейлору – $1,7 \cdot 10^{-5}$ %) (Виноградов, 1962; Taylor, 1964; Перельман, Касимов, 1999). Висмут редкий, но не рассеянный элемент, отлича-

ется хорошей способностью к минералообразованию. По классификации Гольдшмидта (Goldschmidt, 1923; Перельман, Касимов, 1999) элемент относится к халькофильным. Висмут обычно образует сульфиды, но также может встречаться в виде оксидов, теллуридов, селенидов, карбонатов или в виде включений в других минералах. Можно предположить, что наличие минералов висмута может быть связано с проявлением контактного метаморфизма, на что также указывает наличие интрузий сиенита в составе окружающих пород. Предположение о содержании Bi в составе сульфидов не подтвердилось, так как в ходе электронного микрокопирования их обнаружено не было. По данным исследований (Manaka, 2006), висмут в почвах связан с минеральными фазами, чаще всего с оксидами железа и глинистыми минералами. Т. Murata отмечает связь висмута с органиче-

ским веществом и делает упор на зависимости Bi от многих факторов, таких как содержание гуминовых кислот, pH, растворенное органическое вещество, осаждение карбонатов или гидроксидов Bi (Murata, 2010).

U был обнаружен в ксенотиме, также на уровне ошибки U может содержаться в монаците и цирконе; Cd может быть только в качестве изоморфной примеси в самородном цинке; As в составе минералов не обнаружен, но может быть на уровне погрешности в минералах железа, которых в пробах было определено крайне много; Rg обнаружен в фосфатах и других редкоземельных минералах.

Минералогические данные

Согласно исследованию минерального состава под электронным микроскопом были обнаружены следующие микроминеральные фазы: роговые обманки, полевые шпаты, оксиды и гидроксиды железа, Ti-Fe фазы переменного состава, Fe-Mn фазы, сфен, рубинит, Fe-аксинит, альмандин, кварц, циркон, апатит, изоклазит, бадделейт, монтмориллонит, портландит, каолинит, самородный цинк, кальцит, мусковит и др. слюды, турмалин, пироксены, хлорит.

Редкоземельные минералы представлены фосфатами, гейландитом и алюмосиликатом. Распространен монацит.

На основании данных минералогического состава (обилие железо- и титансодержащих минералов; повышенное содержание полевых шпатов, роговых обманок, пироксенов) можно сделать вывод, что отложения разреза являются продуктами разрушения основных пород.

Геохимические показатели

как индикаторы климатических изменений

Общее распределение элементов по профилю характеризуется пиками содержания

большинства изученных химических элементов в темнотумусовом гидротектонизованном горизонте и верхней части подстилающего горизонта (на глубине 80–185 см) (рис. 6, 7). Аккумуляция элементов на данном участке связана с увеличением доли физической глины и накоплением илистых частиц (Zharinova et al., 2023).

Стоит отметить особенности распределения Al, наибольшее содержание которого характерно для верхнего позднеголоценового горизонта на глубине 15–20 см, что можно объяснить накоплением алюминия в составе органо-минеральных комплексов. Si и K отличаются достаточно равномерным распределением по всему профилю с резким снижением в нижней 30-см части профиля, сформированной в позднем плейстоцене, что связано с вымыванием элементов из песчаной толщи. Fe распределено достаточно равномерно по профилю, однако отмечается заметное накопление его в верхнем горизонте позднего голоцена на глубине 10–20 см и вынос данного элемента на глубине 155–160 см (в среднем голоцене); согласно морфологическим исследованиям на глубине 200 см (средний и ранний голоцен) отмечается геохимический барьер, где Fe^{2+} переходит в Fe^{3+} и начинает осаждаться. Mn распределен также достаточно равномерно с небольшими колебаниями значений до глубины 240–245 см (на границе позднего плейстоцена и раннего голоцена), здесь отмечается ярко выраженный геохимический барьер, ниже элемент из отложений выносятся. Высокое содержание P в верхней части профиля связано с его биогенным накоплением в составе растительных и животных организмов и обогащением им гумусового горизонта.

Максимальные содержания Ca в отложениях среднего и позднего голоцена можно связать с распространением в этой части профиля раковин моллюсков (Макаручук, 2019)

и образованием биогеохимического барьера. Наибольшая концентрация ископаемых раковин была обнаружена на глубине 2,0–2,15 м. Всего в отложениях р. Березовка в интервале глубин 1,44–2,7 м было обнаружено и изучено 3420 раковин пресноводных моллюсков и 1701 наземных.

На основе рассчитанных коэффициентов радиальной дифференциации (R), в среднем для профиля, выявлено сильное накопление ($R > 5$) элементов: $Pb > As > Cd > Bi$. Среднее накопление ($R = 5-2$) характерно для $Sm > Cu > Li > Ni > Rb > Ba$. Ряд элементов $Zn > Al > Cr > K > Ga > Mn > Mg > V > Ce > P > Th > Y > Na > Co > Pr > Nd > U > Fe > La > Sr$ характеризуется слабой аккумуляцией в профиле (значения R в пределах 1–2). Для единственного элемента (Ca) установлен вынос из профиля со значением $R < 1$.

Согласно исследованиям В.В. Добровольского (1983), в качестве индикатора гидротермических условий, при которых происходило осадконакопление, целесообразно использовать отношение Sr/Ba . Данный вывод подтверждается результатами исследований, проведенных на территории Западной Сибири, где была показана корреляция между величиной Sr/Ba и степенью увлажнения климата в регионе (Сысо, 2004).

Для позднеголоценовых горизонтов, активно вовлеченных в процесс почвообразования (до глубины 70 см от верха разреза), значения Sr/Ba изменяются в пределах 0,7–0,8, что свидетельствует о близких к современным условиям увлажнения. Для позднеголоценовых отложений, расположенных ниже 70 см, показатель составляет 0,3–0,6 и фиксирует более гумидный климат, по сравнению с современным; в отложениях среднего голоцена эта тенденция сохраняется, значения показателя колеблются от 0,3 до 0,7. На основе значений палеомаркера 0,7–0,9 отмечается

увеличение аридизации климата в раннем голоцене. В позднеплейстоценовых отложениях, сформированных ближе к границе голоцена, Sr/Ba изменяется в пределах 0,5–0,6, что свидетельствует об интервале повышенного увлажнения; для нижележащих горизонтов позднего плейстоцена значения палеомаркера повышаются (0,8–0,9) и свидетельствуют об аридизации.

В качестве индикаторов изменений климата – как потепления, так и похолодания – могут выступать концентрации кобальта (Co), меди (Cu), хрома (Cr) и цинка (Zn). Повышение интенсивности выноса этих элементов в холодные периоды, при наличии сезонного слоя, свидетельствует о понижении температур. Соответственно, снижение значений коэффициентов может рассматриваться как маркер похолодания климата и наоборот. Данная закономерность была выявлена и для территории Восточной Сибири (Иванова, 2019).

Значения индикаторов для отложений разреза Березовка являются преимущественно низкими для позднеголоценовых горизонтов (до 70 см) и характеризуют близкий к современному температурный режим. Наиболее высокие значения индикаторов характеризуют позднеголоценовые отложения на глубине ниже 70 см и свидетельствуют о более теплых условиях их формирования. В отложениях среднего голоцена эта тенденция сохраняется. В раннем голоцене отмечается похолодание. Позднеплейстоценовые отложения, сформированные близко к границе с голоценом, характеризуются некоторым повышением значений индикаторов, что выявляет незначительное потепление. Для более древних горизонтов позднего плейстоцена значения индикаторов вновь становятся низкими и соответствуют похолоданию.

Обсуждение

Основываясь на полученных коэффициентах радиальной дифференциации (R), можно предположить, что большинство выделенных элементов были привнесены во время подъёмов уровней воды в периоды паводков и половодий. В среднем и начале позднего голоцена происходили поднятия уровня воды в р. Енисей и р. Березовка, осуществлялся привнос тонкого илистого материала и химических элементов, преимущественно продуктов разрушения основных пород и элементов антропогенного происхождения. Этим, вероятно, объясняются высокие значения содержания многих (небиогенных) элементов в средней части профиля и наиболее тяжёлый гранулометрический состав.

Во второй половине 20 века сток р. Енисей был зарегулирован в связи со строительством Красноярской ГЭС, мощные паводки и половодья прекратились, влияние реки на осадконакопление на притоках р. Енисей заметно ослабло, что отразилось на изменении гидромиграционных процессов и усилении влияния современных процессов почвообразования, в том числе и на р. Березовка. Опираясь на морфологические и гранулометрические исследования разреза определено, что динамика распределения химических элементов определяется особенностями осадконакопления. Такая же закономерность осадконакопления в период от раннего к позднему голоцену при прогрессирующем похолодании, увеличении влажности климата выявлена А. А. Ямских (Ямских, 2000) в левобережной части долины Среднего Енисея (в долинах рек Бобровка и Язаявка).

На основании проведенных радиоуглеродных исследований установлено, что формирование малакофауны началось в позднеплейстоценовое время около $20\,830 \pm 520$

кал.л.н. (рис. 8). Периодизация развития малакофауны, выраженная в последовательной смене малакофаунистических ассоциаций, была реконструирована на основе изменений таксономического состава с учетом количественных показателей встречаемости раковин моллюсков, относящихся к различным экологическим группам.

В позднем плейстоцене малакофауна включала вид *Vallonia tenuilabris* (Braun, 1843), который типичен для холодных, засушливых и открытых местообитаний, формирующих так называемые холодные степи (Lozek, 1964). Его присутствие в отложениях подтверждает распространение безлесных территорий с суровыми климатическими условиями и соответствует реконструкциям регионального характера растительности этого времени (Ямских, 2016).

Последующее изменение малакофауны сопровождается значительным увеличением количества пресноводных моллюсков – с 4 экземпляров на отметке 2,6 м до 577 на глубине 2,05 м.

В позднем плейстоцене наблюдается рост численности раковин и усложнение состава малакофауны в зависимости от условий среды. Среди пресноводных моллюсков появляются виды, характерные для прогреваемых водоёмов: *Anisus leucostoma* (Millet, 1813), *Lymnaea palustris* (Müller, 1774), и *Lymnaea peregra* (Müller, 1774). Наземная фауна включает немногочисленные раковины мезофильных видов, таких как *Succinella oblonga* (Draparnaud, 1801) и *Perpolita petronella* (Pfeiffer, 1853), а также виды открытых пространств – *V. tenuilabris* и *Pupilla* sp. Обнаружение вида *Fruticicola schrenckii* (Middendorff, 1851), встречающегося в лесах и на кустарниках, может объясняться процессами денудации с горно-лесных участков склонов долины реки Березовка (Ямских, 2016).

Эволюция малакофауны продолжается с возникновением пресноводного вида *Lymnaea truncatula* (Müller, 1774) и влаголюбивых моллюсков *Oxyloma elegans* (Risso, 1826) и *Succinea putris* (Linnaeus, 1758). Параллельно возрастает разнообразие мезофильных форм, включая *Perpolita hammonis* (Strom, 1765) и *Euconulus fulvus* (Müller, 1774), а также видов открытых ландшафтов – *Pupilla alpicola* (Charpentier, 1837) и *Columella columella* (Martens, 1830), что является индикатором увеличения увлажнения территории около 13340±410 кал.л.н.

В начале раннего голоцена наблюдается очередной рост численности раковин как наземных, так и пресноводных моллюсков. Помимо моллюсков временных водоемов, появляются виды, характерные для постоянных: *Gyraulus laevis* (Alder, 1838) и *Pisidium casertanum* (Poli, 1791). Видовое богатство пресноводных моллюсков достигает максимума благодаря появлению *Gyraulus laevis*, *G. rossmaessleri* (Auerswald, 1851), *Aplexa hypnorum* (Linnaeus, 1758) и двустворчатого *P. casertanum*. Наибольшая концентрация раковин *P. casertanum* и *A. leucostoma* зарегистрирована на глубине от 2,35 до 2,25 м. В интервале 2,35–2,05 м установлено резкое увеличение обилия пресноводного вида *G. laevis* и десятикратный рост численности наземного *S. putris*, что свидетельствует о возрастании увлажнения на территории исследования. В это же время увеличивается разнообразие наземных видов до 12 таксонов, включая *Vertigo genesioides* (Nekola et al., 2018), *V. pygmaea* (Draparnaud, 1801), *V. antivertigo* (Draparnaud, 1801), *Vallonia pulchella* (Müller, 1774), *V. costata* (Müller, 1774) и *Cochlicopa lubrica* (Müller, 1774).

На границе среднего и раннего голоцена (8805±200 кал.л.н.) отмечается постепенное сокращение численности пресноводных моллюсков с 250 раковин до минимального значения

2 экземпляра, в то время как количество наземных видов увеличивается главным образом за счёт *V. pulchella* и *V. costata*. В конце среднего голоцена около 5230±250 кал.л.н. состав малакофауны характеризовался присутствием обитателей открытых биотопов и мезофильных видов. На границе среднего и позднего голоцена фиксируется исчезновение моллюсков, что отражает похолодание и увеличение влажности климата (Ямских, 2000).

Анализ значений элементов-индикаторов Cu, Co, Cr, Zn и палеомаркера Sr/Ba позволил установить, что в позднем плейстоцене (примерно 20830±520 кал.л.н.) в долине реки Березовка сухие и холодные условия сменились более влажным и теплым климатом (13340±410 кал.л.н.). О возросшем увлажнении свидетельствует также появление наземных влаголюбивых моллюсков и пресноводных видов. В раннем голоцене (8805±200 кал.л.н.) климатические условия стали более засушливыми и холодными. Резкое сокращение численности и снижение видового разнообразия пресноводной малакофауны при доминировании наземных видов указывает на изменение климата и ландшафтов на границе среднего и раннего голоцена. В среднем (5230±250 кал.л.н.) и позднем голоцене (1020±220 кал.л.н.) увеличивается влажность и теплообеспеченность по сравнению с современными условиями. В позднем голоцене (220±70 кал.л.н. – настоящее время) климат приблизился к современному, что согласуется с палинологическими, палеогидрологическими и литологическими исследованиями отложений 35–40 террасы Енисея в Красноярской котловине, проведенными А. Ф. Ямских (1987) и Г. Ю. Ямских (Yamskikh, 2002).

Заключение

Начало формирования отложений первой надпойменной террасы р. Березовка началось

20830±520 кал.л.н. Процесс накопления осадков завершился около 220±70 кал.л.н. формированием хорошо развитой аллювиальной темногумусовой гидрометаморфизованной почвы. Макроморфологические исследования позволили выявить процессы гумусообразования, гумусонакопления и глеевого процесса при формировании толщ отложений террасы. По гранулометрическому составу отложения изменяются от легкосуглинистых до глин легких, наибольшее содержание илистых фракций отмечается в позднем голоцене, с чем связано накопление здесь большинства элементов и образование глинистых минералов.

Ископаемые раковины моллюсков приурочены к отложениям тяжелого суглинка. Таксономический анализ выявил присутствие 28 таксонов, 24 из которых были определены до видов, включая 8 пресноводных и 16 наземных. Несмотря на преобладание наземных видов, 67 % от общего числа найденных раковин составляют пресноводные моллюски. Доминирующими в ископаемых сообществах являются представители семейств Planorbidae Rafinesque, 1815 и Valloniidae Morse, 1864.

Высокие (относительно кларка земной коры) содержания большинства элементов объясняются составом подстилающих и окружающих пород, что подтверждается исследованием минералогического состава, однако экстремально высокие значения кларков концентрации некоторых элементов указывают на антропогенное происхождение. Дискуссионным остается вопрос о значительном превышении содержания висмута в отложениях.

Распределение по профилю большинства элементов и накопление их в среднем и позднем голоцене (5230±250 кал.л.н., 1020±220 кал.л.н.) объясняется повышением доли ила и глинистых минералов, которые выступают в качестве сильных сорбентов. Выявлены биогеохимические барьеры в отложениях финала позднего голоцена, связанные с повышенным содержанием фосфора и алюминия (в составе органо-минеральных комплексов), а также с накоплением раковин моллюсков (повышение концентрации кальция). Коэффициент радиальной миграции показал, что большинство выделенных элементов были привнесены во время паводков и половодий. Обилие полевых шпатов, роговых обманок, пироксенов и высокое содержание титан- и железосодержащих минералов указывает на то, что отложения р. Березовка также являются и продуктами разрушения основных пород водосбора.

Результаты комплексного изучения отложений в долине р. Березовка формируют основу для выявления и сравнения спонтанных и антропогенных изменений состояния природной среды в долине Среднего Енисея и сопредельных территорий.

Реконструкция палеогеографических условий финала позднего плейстоцена и голоцена на основе изучения террасовых отложений Красноярской котловины, накопление которых происходило непрерывно, составляет базу для будущих фундаментальных научных исследований Красноярской агломерации в условиях антропогенного давления.

Список литературы / References

- Алексеев В. А., Алексеев А. В. (2013) *Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов*. Ростов-на-Дону, Издательство Южного федерального университета, 380 с. [Alekseenko V. A., Alekseenko A. V. (2013) *Chemical elements in geochemical systems. The abundances in urban soils*. Rostov-on-Don, Southern Federal University, 380 p. (in Russian)]

Алексеев В. А., Алексеев А. В., Швыдкая Н. В., Писаренко Г. П. (2018) О геохимическом облике почв населенных пунктов. *Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции (г. Ишим; 16 марта 2018 г.)*. Козловцева О. С. (отв. ред.) Ишим, Изд-во ИПИ им. П. П. Ершова (филиал) ТюмГУ, с. 67–71 [Alekseenko V. A., Alekseenko A. V., Shvydkaya N. V., Pisarenko G. P. (2018) On geochemistry of soils of residential settlements. *Proceedings of 5th international scientific-practical conference urboecosystems: problems and prospects of development (Ishim, 16 march, 2018)*. Kozlovtsseva O. S. (Editor-in-Chief) Ishim, Ershov Ishim Teacher Training Institute (Branch) of Tyumen State University, p. 67–71 (in Russian)]

Андреева С. И., Андреев Н. И., Винарский М. В. (2010) *Определитель пресноводных брюхоногих моллюсков (Mollusca: Gastropoda) Западной Сибири. Ч. 1. Gastropoda: Pulmonata. Вып. 1. Семейства Acroloxidae и Lymnaeidae*. Омск, 200 с. [Andreyeva S. I., Andreyev N. I., Vinarski M. V. (2010) *Key to freshwater gastropods of Western Siberia (Mollusca: Gastropoda). V. 1. Gastropoda: Pulmonata. Fasc. 1. Families Acroloxidae and Lymnaeidae*. Omsk, 200 p. (in Russian)]

Аринушкина Е. В. (1970) *Руководство по химическому анализу почв*. Москва, Издательство Московского университета, 487 с. [Arinushkina E. V. (1970) *Guide on chemical analysis of soils*. Moscow, Moscow University, 487 p. (in Russian)]

Виноградов А. П. (1962) Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. *Геохимия*, 7: 555–572 [Vinogradov A. P. (1962) Average contents of chemical elements in the main types of erupted rocks of the Earth's crust. *Geochemistry* [Geokhimiya], 7: 555–572 (in Russian)]

Добровольский В. В. (1983) *География микроэлементов: Глобальное рассеяние*. Москва, Мысль, 272 с. [Dobrovolsky V. V. (1983) *Geography of microelements: Global dispersion*. Moscow, Mysl, 272 p. (in Russian)]

Егоров В. В., Фридланд В. М., Иванова Е. Н., Розов Н. Н., Носин В. А., Фриев Т. А. (1977) *Классификация и диагностика почв СССР*. Москва, Колос, 224 с. [Egorov V. V., Fridland V. M., Ivanova E. N., Rozov N. N., Nosin V. A., Frieve T. A. (1977) *Classification of soils of the USSR*. Moscow, Nauka, 224 p. (in Russian)]

Жаринова Н. Ю. (2011) *Почвы пойм малых рек Красноярской лесостепи. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Красноярск, 18 с. [Zharinova N. Yu. (2011) *Floodplain soils of small rivers of the Krasnoyarsk forest steppe. Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences*. Krasnoyarsk, 18 p. (in Russian)]

Жуйко И. П., Беззубцев В. В., Парфенов Ю. И., Гончаров Ю. И. (1959) *Геологическая карта СССР Восточного Саяна и Енисейской серии* [Zhuiko I. P., Bezzubtsev V. V., Parfenov Y. I., Goncharov Y. I. (1959) *Geological map of the USSR East Sayan and Yenisei series* (in Russian)]

Иванов И. В., Демкин В. А. (1996) Проблемы генезиса и эволюции степных почв: история и современное состояние. *Почвоведение*, 3: 324–334 [Ivanov I. V., Demkin V. A. (1996) Problems of genesis and evolution of steppe soils: history and state of the art. *Eurasian Soil Science*, 29(3): 286–296]

Иванова В. В. (2019) *Геохимические особенности спектров редкоземельных элементов в отложениях Восточной Сибири как новый индикатор изменения климата позднего плейстоцена в зоне перигляциального литогенеза. Автореферат диссертации на соискание ученой*

степени доктора геолого-минералогических наук. Санкт-Петербург, 45 с. [Ivanova V. V. (2019) *Geochemical features of the spectra of rare earth elements in sediments of Eastern Siberia as a new indicator of climate change in the Late Pleistocene in the zone of periglacial lithogenesis. Abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences*. St. Petersburg, 45 p. (in Russian)]

Кириллов М. В. (1988) *Природа Красноярска и его окрестностей*. Красноярск, Красноярское книжное издательство, 149 с. [Kirillov M. V. (1988) *Nature of Krasnoyarsk and its surroundings*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Book Publishing House, 149 p. (in Russian)]

Лебедева Н. В. (2011) *Моллюски голоцена Южно-Минусинской котловины. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук*. Томск, 26 с. [Lebedeva N. V. (2011) *Mollusks of the Holocene of the South Minusinsk Basin. Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences*. Tomsk, 26 p. (in Russian)]

Лихарев И. М., Раммельмейер Е. С. (1952) *Наземные моллюски фауны СССР*. Москва, Ленинград, Издательство Академии наук СССР, 511 с. [Likharev I. M., Rammelmeyer E. S. (1952) *Land mollusks of the fauna of the USSR*. Moscow, Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 511 p. (in Russian)]

Макарчук Д. Е. (2019) *Моллюски голоцена Красноярской котловины (пространственно-временное распространение и палеогеографические условия обитания). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук*. Томск, 23 с. [Makarchuk D. E. (2019) *Holocene mollusks of the Krasnoyarsk Depression (spatiotemporal distribution and paleogeographic habitat conditions). Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Geography Sciences*. Tomsk, 23 p. (in Russian)]

Махлаев М. Л., Перфилова О. Ю., Спиридонова Э. В. (2012) Роль геологических факторов в формировании природных ландшафтов низкогогорья на примере окрестностей Красноярска. *География, история и геоэкология на службе науки и инновационного образования. Материалы всероссийской с международным участием научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню земли и 75-летию кафедры физической географии и геоэкологии. Красноярск, 19–20 апреля 2012 г. Вып. 7*. Красноярск, Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева, с. 97–99 [Makhlaev M. L., Perfilova O. Yu., Spiridonova E. V. (2012) The role of geological substrate for the formation of the low mountains natural landscapes in vicinities of Krasnoyarsk for example. *Geography, history and geoecology in the service of science and innovative education. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the World Earth Day and the 75th anniversary of the Department of Physical Geography and Geoecology. Krasnoyarsk, April 19–20, 2012. Issue 7*. Krasnoyarsk, V. P. Astafyev Krasnoyarsk State Pedagogical University, p. 97–99 (in Russian)]

Молчанова И. В., Караваева Е. Н., Михайловская Л. Н., Позолотина В. Н., Лобанова Л. В. (2003) Барьерно-регулирующая роль пойменных почв в миграции радионуклидов (на примере речной системы Теча-Исеть). *Экология*, 4: 267–273 [Molchanova I. V., Karavaeva E. N., Mikhailovskaya L. N., Pozolotina V. N., Lobanova L. V. (2003) The role of floodplain soils as a barrier to radionuclide migration: an example of the Techa–Iset’ river system. *Russian Journal of Ecology*, 34(4): 236–241]

Пармузин Ю. П. (1964) *Средняя Сибирь: очерк природы*. Москва, Мысль, 312 с. [Parmuzin Yu. P. (1964) *Middle Siberia: An essay on the wildlife*. Moscow, Mysl, 312 p. (in Russian)]

Перельман А. И., Касимов Н. С. (1999) *Геохимия ландшафта*. Москва, Астрей-2000, 763 с. [Perelman A. I., Kasimov N. S. (1999) *Landscape geochemistry*. Moscow, Astreya-2000, 763 p. (in Russian)]

Пономарева В. В., Плотникова Т. А. (1980) *Гумус и почвообразование (методы и результаты изучения)*. Ленинград, Наука, 222 с. [Ponomareva V. V., Plotnikova T. A. (1980) *Humus and soil formation*. Leningrad, Nauka, 222 p. (in Russian)]

Сазонов А. М., Цыкин Р. А., Ананьев С. А., Перфилова О. Ю., Махлаев М. Л., Сосновская О. В. (2011) *Путеводитель по учебным геологическим маршрутам в окрестностях г. Красноярска*. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 211 с. [Sazonov A. M., Tsykin R. A., Ananyev S. A., Perfilova O. Yu., Makhlaev M. L., Sosnovskaya O. V. (2011) *A guidebook to geological routes in the vicinities of Krasnoyarsk*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 211 p. (in Russian)]

Санько А. Ф. (2000) *Малакофауна гляциоплейстоцена и голоцена Беларуси: состав, распространение, история развития. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук*. Минск, 42 с. [Sanko A. F. (2000) *Malacofauna of the Glacio-Pleistocene and Holocene of Belarus: composition, distribution, history of development. Abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences*. Minsk, 42 p. (in Russian)]

Санько А. Ф. (2007) *Четвертичные пресноводные моллюски Беларуси и смежных регионов России, Литвы, Польши (атлас-определитель)*. Минск, Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси, 156 с. [Sanko A. F. (2007) *Quaternary freshwater mollusks of Belarus and adjacent regions of Russia, Lithuania, Poland (atlas-identifier)*. Minsk, Institute of Geochemistry and Geophysics of the National Academy of Sciences of Belarus, 156 p. (in Russian)]

Сысо А. И. (2004) *Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук*. Новосибирск, 358 с. [Syso A. I. (2004) *Patterns of the distribution of chemical elements in parent rocks and soils of Western Siberia. Dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences*. Novosibirsk, 358 p. (in Russian)]

Фадеева Н. В. (1996) Котловинные геосистемы. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 3: 35–48 [Fadeeva N. V. (1996) Hollow geosystems. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 3: 35–48 (in Russian)]

Шейн Е. В. (2009) Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций. *Почвоведение*, 3: 309–317 [Shein E. V. (2009) The particle-size distribution in soils: problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. *Eurasian Soil Science*, 42(3): 284–291]

Шилейко А. А. (1984) *Фауна СССР. Моллюски. Т. 3, вып. 3. Наземные моллюски подотряда Pupillina фауны СССР (Gastropoda, Pulmonata, Geophila)*. Ленинград, Наука, 399 с. [Shileiko A. A. (1984) *Fauna of the USSR. Mollusks. Vol. 3, issue 3. Land mollusks of the suborder Pupillina of the fauna of the USSR (Gastropoda, Pulmonata, Geophila)*. Leningrad, Nauka, 399 p. (in Russian)]

Шиманская А. А., Позняк С. С. (2016) Профильное распределение меди, цинка и свинца в пойменных почвах Мозырского полесья. *Экологический вестник*, 1: 118–123 [Shimanskaya A. A.,

Pazniak S.S. (2016) Profile distribution of copper, zinc and lead in the floodplain soils of Mozyr Polesye. *Ecological Bulletin* [Ekologicheskii vestnik], 1: 118–123 (in Russian)]

Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. (2004) *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск, Ойкумена, 342 с. [Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. (2004) *Classification and diagnostics of soils in Russia*. Smolensk, Oikumena, 342 p. (in Russian)]

Шпедт А.А., Жаринова Н.Ю., Ямских Г.Ю., Александрова С.В. (2015) Оценка почв земледельческой части Красноярского края. *Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ*. Томск, Издательский Дом Томского государственного университета, с. 293–296 [Shpedt A.A., Zharinova N.U., Yamskikh G.U., Aleksandrova S.V. (2015) Soil evaluation of agricultural part of Krasnoyarsk Krai. *Reflection bio-geoantroposferal interactions in soils and soil cover: Collection of materials V International Scientific Conference, dedicated to the 85th anniversary of the opening of the first university department of Soil Science in Siberia*. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University, p. 293–296 (in Russian)]

Ямских А.А. (2000) *Голоценовые хроноряды аллювиальных дерновых почв в долине Среднего Енисея: палеоэкологические реконструкции. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Красноярск, 20 с. [Yamskikh A.A. (2000) *Holocene chronosequences of alluvial soddy soils in the valley of the Middle Yenisei: paleoecological reconstructions. Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences*. Krasnoyarsk, 20 p. (in Russian)]

Ямских А.Ф. (1987) О полицикловых террасах в долине Среднего Енисея. *Палеогеография Средней Сибири*. Красноярск, с. 6–26 [Yamskikh A.F. (1987) On polycyclic terraces in the Middle Yenisei valley. *Paleogeography of Central Siberia*. Krasnoyarsk, p. 6–26 (in Russian)]

Ямских А.Ф. (1992) *Полицикловое террасообразование и статиграфическое расчленение четвертичных отложений речных долин ледниковой зоны Приенисейской Сибири*. Красноярск, КГПИ, 55 с. [Yamskikh A.F. (1992) *Cycle-by-Cycle terracing and stratigraphic subdivision of Quaternary deposits in river valleys of the Glacial Zone of Yenisei Siberia*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Pedagogical Institute, 55 p. (in Russian)]

Ямских А.Ф. (1993) *Осадконакопление и террасообразование в речных долинах Южной Сибири*. Красноярск, КГПИ, 226 с. [Yamskikh, A. F. (1993) *Sedimentation and terracing in river valleys of Southern Siberia*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Pedagogical Institute, 226 p. (in Russian)]

Ямских Г.Ю. (2016) Позднеплейстоцен-голоценовые климаты и растительность Красноярской котловины. *Пути эволюционной географии: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко (Москва, 23–25 ноября 2016 г.)*. Москва, Институт географии РАН, с. 386–390 [Yamskih G. Yu. (2016) Late Pleistocene-Holocene climate and vegetation in the Krasnoyarsk basin. *Routes of Evolutionary Geography: Proceedings of the Scientific Conference in memory of professor A. A. Velichko (Moscow, November 23–25, 2016)*. Moscow, Institute of Geography RAS, p. 386–390 (in Russian)]

Ямских Г.Ю. (2022) *Количественная оценка элементов климата голоцена и реконструкции палеоландшафтов внутриконтинентальных территорий Приенисейской Сибири (на ос-*

нове палинологических данных). Красноярск, Сибирский федеральный университет, 237 с. [Yamskikh G. Yu. (2022) *Quantitative assessment of Holocene climate elements and reconstruction of paleolandscapes of intracontinental territories of Yenisei Siberia (based on palynological data)*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 237 p. (in Russian)]

Alexandrowicz S.W., Alexandrowicz W.P. (2011) *Analiza malakologiczna. Metody badan i interpretacji*. Krakow, Polska Akademia Umiejętności, 301 p. (in Polish)

Berner Z. A., Bleeck-Schmidt S., Stüben D., Neumann T., Fuchs M., Lehmann M. (2012) Floodplain deposits: a geochemical archive of flood history – A case study on the River Rhine, Germany. *Applied Geochemistry*, 27(3): 543–561

Blaauw M., Christen J. A. (2011) Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 6(3): 457–474

Budko D. F., Demina L. L., Novichkova E. A., Polyakova Y. I., Kravchishina M. D., Melenevsky V. N., (2020) Postglacial sedimentation in the White Sea (northwestern Russia) reconstructed by integrated microfossil and geochemical data. *Quaternary Research*, 93: 110–123

Chen D., Pan B., Ma J., Hu X., Geng H., Pang H. (2020) Paleoclimatic record from the clay mineralogy of Quaternary sediments of drill core DWJ from Jiudong subbasin (western Hexi Corridor), NW China. *Quaternary Research*, 93: 124–138

Gocht T., Moldenhauer K.-M., Püttmann W. (2001) Historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and heavy metals in floodplain sediments from the Rhine River (Hessisches Ried, Germany). *Applied Geochemistry*, 16(15): 1707–1721

Goldschmidt V.M. (1923) Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente. I. Allgemeine Betrachtungen. *Videnskapselskapets Skrifter. I. Matematisk–Naturvidenskapelig Klasse, Jahrg.*, 3: 1–17

Keen-Zebert A., Tooth S., Rodnight H., Duller G. A. T., Roberts H. M., Grenfell M. (2013) Late Quaternary floodplain reworking and the preservation of alluvial sedimentary archives in unconfined and confined river valleys in the eastern interior of South Africa. *Geomorphology*, 185: 54–66

Liu B., Phillips F.M., Pohl M.M., Sharma P. (1996) An alluvial surface chronology based on cosmogenic ³⁶Cl dating, Ajo Mountains (Organ Pipe Cactus National Monument), Southern Arizona. *Quaternary Research*, 45(1): 30–37

Lombardi R., Davis L., Stinchcomb G. E., Munoz S. E., Stewart L., Therrell M. D. (2020) Fluvial activity in major river basins of the eastern United States during the Holocene. *The Holocene*, 30(9): 1279–1295

Ložek V. (1964) *Quartermollusken der Tschechoslowakei*. Rozpr. Ustred. Ustavu Geol., 374 p.

Manaka M. (2006) Amount of amorphous materials in relationship to arsenic, antimony, and bismuth concentrations in a brown forest soil. *Geoderma*, 136(1–2): 75–86

Matys Grygar T., Elznicová J., Bábek O., Hošek M., Engel Z., Kiss T. (2014) Obtaining isochrones from pollution signals in a fluvial sediment record: A case study in a uranium-polluted floodplain of the Ploučnice River, Czech Republic. *Applied Geochemistry*, 48: 1–15

Murata T. (2010) Bismuth solubility through binding by various organic compounds and naturally occurring soil organic matter. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45(6): 746–753

Olszak J., Kukulak J., Alexanderson H. (2019) Climate control on alluvial sediment storage in the northern foreland of the Tatra Mountains since the late Pleistocene. *Quaternary Research*, 91(2): 520–532

Piechocki A. (1979) *Fauna słodkowodna Polski. Zeszyt 7. Mięczaki (Mollusca), ślimaki (Gastropoda)*. Warszawa, Poznań, Państwowe wydawnictwo naukowe, 187 p. (in Poland)

R Core Team (2020) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

Reimer P.J., Austin W.E. N., Bard E., Bayliss, A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S. M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. (2020) The IntCal20 northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4): 725–757

Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L. S., Bezrukova E., Dobrynin D., Timireva S., Rusakov A., Maksimov F. (2021) A multiproxy record of sedimentation, pedogenesis, and environmental history in the north of West Siberia during the late Pleistocene based on the Belaya Gora section. *Quaternary Research*, 99: 204–222

Taylor S.R. (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(8): 1273–1285

Vandenbergh J., Yang X., Wang X., Wang S., Lu H. (2021) Diverse floodplain deposits of reworked loess in a monsoon climate (Hanzhong Basin, central China). *Quaternary Research*, 103: 4–20

Walker M.J. C., Berkelhammer M., Björck S., Cwynar L.C., Fisher D.A., Long A.J., Lowe J.J., Newnham R.M., Rasmussen S.O., Weiss H. (2012) Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*, 27(7): 649–659

Waters M.R., Nordt L.C. (1995) Late Quaternary floodplain history of the Brazos River in East-Central Texas. *Quaternary Research*, 43(3): 311–319

Yamskikh A.F. (1996) Late Quaternary intra-continental river palaeohydrology and polycyclic terrace formation: the example of south Siberian river valleys. *Global continental changes: the context of palaeohydrology. Geological Society special publication No. 115*. Branson J., Brown A.G., Gregory K.J. (Eds.) London, Geological Society, p. 181–190

Yamskikh A.F., Yamskikh A.A., Brown A.G. (1999) Siberian-type Quaternary floodplain sedimentation: the example of the Yenisey river. *Fluvial Processes and Environmental Change*. Brown A.G., Quine T.A. (Eds.) England, John Wiley & Sons, p. 241–252

Yamskikh G.Y. (2002) Middle-Siberian phenomenon of intracontinental type change of the vegetation and climate. *Abstracts of the 45th IAVS Symposium*. Brazil, Porto Alegre, p. 209–211

Zharinova N. Yu., Yamskikh G. Yu., Zbucki Ł., Makarchuk D.E. (2023) Geochemistry of Holocene – Late Pleistocene sediments in the Berezovka River valley (Near-Yenisey Siberia). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 68(2): 311–330

EDN: MZFHOR

УДК 630*182.1:561(235.223)| 628.64

Reconstructing Holocene Paleoenvironments in the Eastern Sayan Foothills: Multi-Proxy Peat Record from the Bolshoy Inzhul Mire (Krasnoyarskie Stolby National Park, Russia)

**Anna V. Grenaderova^{a*}, Anastasia A. Knorre^{a, b},
Georgiy E. Ponomarev^a, Daria A. Kuznetsova^a,
Anna V. Gireva^b, Anna E. Barabantsova^b,
Dana Yu. Pavlova^b, Alexandra B. Mikhailova^a,
Olga V. Podobueva^a and Irina P. Filippova^a**

^aSiberian Federal University

Krasnoyarsk, Russian Federation

^bKrasnoyarskie Stolby National Park

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 28.03.2025, received in revised form 15.07.2025, accepted 8.09.2025

Abstract. Climate change inevitably leads to transformations in vegetation cover through various impacts including fires. Paleocological studies are crucial for assessing rates of contemporary environmental changes, particularly in protected areas, where data on paleofire history can serve as a baseline for monitoring current fire regimes. The purpose of the present study was to reconstruct local vegetation dynamics and fire history in the upper Bolshoy Inzhul River catchment area through a multi-proxy paleocological analysis of Holocene peat deposits. This study presents the results of a paleobotanical investigation of peat deposits from the low-mountain region of the northwestern macroslope of the Eastern Sayan Range. We provide data derived from accelerator mass spectrometry (AMS) radiocarbon dating, botanical analysis, and paleoanthracological examination. For the first time, within the Krasnoyarskie Stolby National Park, macrocharcoal particle analysis was performed, combined with high-resolution sampling (1-cm intervals) and detailed chronological control (16 radiocarbon dates), enabling the reconstruction of fire event frequency and intensity. The results demonstrate exceptionally low macrocharcoal concentrations in the Bolshoy Inzhul mire deposits (no greater than 18 particles/cm³). Periods of increased fire activity were identified and correlated with global climatic shifts: the

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: grenaderova-anna@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5599-2129 (Grenaderova A.); 0000-0001-9033-2292 (Knorre A.); 0000-0003-0104-9036 (Pavlova D.); 0000-0002-3198-5215 (Mikhailova A.); 0009-0002-4987-0077 (Podobueva O.)

Holocene Thermal Maximum (8.2–5.7 cal BP), the Mid-Subboreal climatic optimum (4.4–3.5 cal BP), and the increase in climate continentality in the recent 600 years. The peat accumulation process was initiated by reduced moisture availability during the early neoglacial period (5.4–4.7 cal BP), when paludification started in a mixed fir–spruce forest with Siberian pine, Scots pine and a horsetail-green moss understory in the interfluvium of the Bolshoy Inzhul River headwaters. A forested mire (sogra) persisted for an extended period. Starting from 3.0–2.4 cal BP, the influence of fluvial waters on mire hydrology diminished, leading to a succession from forested to transitional forest-mire, and, eventually, to a raised mire stage dominated by Sphagnum mosses. Over the past 70 years, the mire vegetation has been represented by a waterlogged spruce forest with a ground layer of cowberry, cranberry and Sphagnum moss.

Keywords: vegetation dynamics, peat deposits, Holocene, charcoal, fire history, protected areas, Eastern Sayan.

Acknowledgements. The study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 23–27–00341, <https://rscf.ru/project/23–27–00341/>

Citation: Grenaderova A. V., Knorre A. A., Ponomarev G. E., Kuznetsova D. A., Gireva A. V., Barabantsova A. E., Pavlova D. Yu., Mikhailova A. B., Podobueva O. V., Filippova I. P. Reconstructing Holocene paleoenvironments in the Eastern Sayan foothills: Multi-proxy peat record from the Bolshoy Inzhul mire (Krasnoyarskie Stolby National Park, Russia). J. Sib. Fed. Univ. Biol., 2025, 18(3), 389–418. EDN: MZFHOR



Палеоэкологические условия в низкогорье Восточного Саяна в голоцене: по данным изучения болота в верховье р. Большой Инжул на территории национального парка «Красноярские Столбы»

А. В. Гренадерова^а, А. А. Кнорре^{а, б},
Г. Е. Пономарев^а, Д. А. Кузнецова^а,
А. В. Гирева^б, А. Е. Барабанцова^б, Д. Ю. Павлова^б,
А. Б. Михайлова^а, О. В. Подобуева^а, И. П. Филиппова^а

^аСибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

^бНациональный парк «Красноярские Столбы»

Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Изменение климата неизбежно влечет преобразование растительного покрова, в том числе под воздействием пирогенного фактора. Палеоэкологические исследования представляют значительный интерес для оценки скоростей современных изменений природной среды. Это особенно актуально для территорий с особым режимом охраны, где данные о палеопожарной истории могут послужить отправной точкой в мониторинге пожарной ситуации. Цель

исследования: оценка динамики локальной растительности и пожаров в верховье р. Большой Инжул на основе комплексного палеоэкологического анализа голоценовых болотных отложений. В статье представлены результаты палеоботанического изучения болотных отложений в низкогорье северо-западного макросклона Восточного Саяна. Приводятся результаты AMS-датирования, ботанического анализа торфа. Впервые для территории национального парка «Красноярские Столбы» был использован анализ макроскопических частиц угля, что в совокупности с малым интервалом отбора проб и детальным датированием позволило проследить ход и интенсивность пожарных событий за большую часть голоцена. Установлено, что содержание частиц макроугля в отложениях болота Большой Инжул весьма низкое, концентрация не превышает – 18 частиц/см³. Выявленные интервалы усиления пожарной активности связаны с глобальными климатическими изменениями: термический оптимум голоцена (8,2–5,7 тысячи калиброванных лет назад (тыс. кал.л.н.)), суббореальный максимум (4,4–3,5 тыс. кал.л.н.) и последние 600 лет, отличающиеся нарастанием континентальности климата. Процесс торфонакопления датирован началом неогляциала (5,4–4,7 тыс. кал.л.н.), когда в междуречье истоков р. Большой Инжул начал заболачиваться смешанный пихтово-еловый с кедром и сосной хвощово-зеленомошный лес. Длительное время развивалось лесное болото (согра). Начиная с 3,0–2,4 тыс. кал.л.н. значение речных вод в питании болота ослабевает, лесная стадия развития сменяется лесо-топяной, а затем топяной стадией с господствующим положением сфагнового мха. Последние 70 лет растительность на болоте представлена ельником заболоченным бруснично-клюквенно-сфагновым.

Ключевые слова: динамика растительности, торфяная толща, болото, голоцен, пожары, частицы макроугля, особо охраняемая природная территория, Восточный Саян.

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

Цитирование: Гренадерова А. В. Палеоэкологические условия в низкогорье Восточного Саяна в голоцене: по данным изучения болота в верховье р. Большой Инжул на территории национального парка «Красноярские Столбы» / А. В. Гренадерова, А. А. Кнорре, Г. Е. Пономарев, Д. А. Кузнецова, А. В. Гирева, А. Е. Барабанцова, Д. Ю. Павлова, А. Б. Михайлова, О. В. Подобуева, И. П. Филиппова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2025. 18(3). С. 389–418. EDN: MZFNOR

Введение

Стремительно меняющиеся современные условия среды, к которым в первую очередь относится изменение климата, влечет за собой неизбежное преобразование растительного покрова. Причем процесс трансформации значительно ускоряется под влиянием факторов, сопутствующих климатическим стрессам, – пирогенным, инвазионным и др. Это диктует необходимость частных ретроспективных исследований для широкого спектра

территорий, позволяющих более точно идентифицировать динамику развития экосистем в прошлом для оценки скоростей современных изменений и возможного прогноза.

По данным В. В. Фурьева (Лесные экосистемы., 2002), для Средней Сибири доля производных послепожарных сообществ в южной тайге составляет 43 %, что говорит о значительном вкладе пирогенного фактора в изменение растительности. Многолетние колебания пожаров имеют циклическую при-

роду, и для района южной тайги средним периодом такой цикличности еще 20 лет назад был период в 45–50 лет (Арбатская, 1998). Моделирование пожарных режимов показывает, что в связи с потеплением климата к концу нынешнего века в бореальной зоне Евразии число крупных и катастрофических пожаров может существенно увеличиться при одновременном сокращении межпожарного интервала (Flannigan et al., 2009).

В последние 100 лет, благодаря особому режиму охраны на территории, относящейся к национальному парку «Красноярские Столбы», общий тренд горимости лесов снижен по сравнению с прилегающими участками. История фактической горимости национального парка подробно изучена на основе геоинформационной базы данных (Ерунова, Кнорре, 2022). Показано, что начиная с 1942 года большая часть (59 %) пожаров происходила на участках с преобладанием сосны обыкновенной, что является естественным по приуроченности данной породы к достаточно сухим местообитаниям с доминированием в напочвенном покрове сухомшистых, лишайниковых и мелкотравных ассоциаций. Основным типом пожаров на всем протяжении истории заповедной территории является низовой от слабой до средней интенсивности. Однако значительные изменения климата с явной тенденцией на увеличение сухости (Гончарова, Кнорре, 2018; Харук и др., 2019; Кнорре и др., 2021, 2023) ставят под угрозу и иные местообитания, не подверженные пирогенному воздействию последние 100 лет. Так, данные, полученные при изучении торфяной толщи в долине р. Большой Инжул (Карпенко, Кнорре, 2019), указывают на наличие прослоек торфа с углистыми частицами в придонной части, что свидетельствует об имевших место пожарах на заболоченных участках. При детальном эколого-фитоценоотическом изуче-

нии палеокарпологического материала выявлены значительные изменения растительного покрова в позднем голоцене (за период ~ 4 тыс. лет), под влиянием климатических изменений, включая воздействие пирогенного фактора (Кошкаров и др., 2021). О пожарах свидетельствует присутствие в комплексах, особенно раннего возраста, генеративных органов растений – представителей послепожарных сукцессий, а также многочисленные кусочки древесного угля (Кошкарлова и др., 2006).

Отправной точкой в оценке современного состояния пирогенной ситуации могут послужить данные о палеопожарной истории, полученные с помощью анализа частиц макроугля из голоценовых болотных отложений. Палеоантракологический анализ совместно с данными радиоуглеродного датирования позволяет рассчитать скорость аккумуляции частиц угля, выделить пожарные пики, определить частоту пожарных эпизодов в разные этапы голоцена. В России исследования с применением анализа макроскопических частиц угля начали появляться относительно недавно (Katamura et al., 2009; Novenko et al., 2016; Разжигаяева и др., 2018; Barhoumi et al., 2019, 2021; Куприянов, Новенко, 2019; Rudaya et al., 2020; Mazei et al., 2020; Пупышева, Бляхарчук, 2023), в том числе работы по реконструкции пожарного режима в голоцене для территории Сибири (Гренадерова и др., 2021; Бляхарчук и др., 2021; Мазей и др., 2021; Пронович, Гренадерова, 2021; Куприянов и др., 2021; Novenko et al., 2022; Бляхарчук, Пупышева, 2022; Рогозин и др., 2023a, 2023b; Pupyshcheva, Blyakharchuk, 2024; Пупышева, Бляхарчук, 2024; Mikhailova et al., 2024; Shatunov et al., 2024; Grenaderova et al., 2024, 2025).

Цель настоящей работы – оценка динамики локальной растительности и пожаров

в низкогорье западной части Восточного Саяна за последние ≈ 10 тысяч калиброванных лет на основе комплексного палеоэкологического анализа отложений болотного массива в верховье реки Большой Инжул.

Характеристика района исследования

Исследуемый болотный комплекс располагается в верховье р. Большой Инжул (лево-бережный приток р. Базаиха) на территории национального парка «Красноярские Столбы».

бы» (рис. 1), которая ограничивается координатами: $55^{\circ}38' - 55^{\circ}58'$ с.ш. и $92^{\circ}20' - 93^{\circ}20'$ в.д. и находится на западной оконечности главного водораздельного хребта Восточного Саяна.

Район исследования, согласно (Геоморфологическое районирование СССР..., 1980), относится к Манскому району, Северо-Западной области, геоморфологической провинции Восточный Саян. Северо-Западная область Восточного Саяна располагается западнее Канского Белогорья, по сравне-

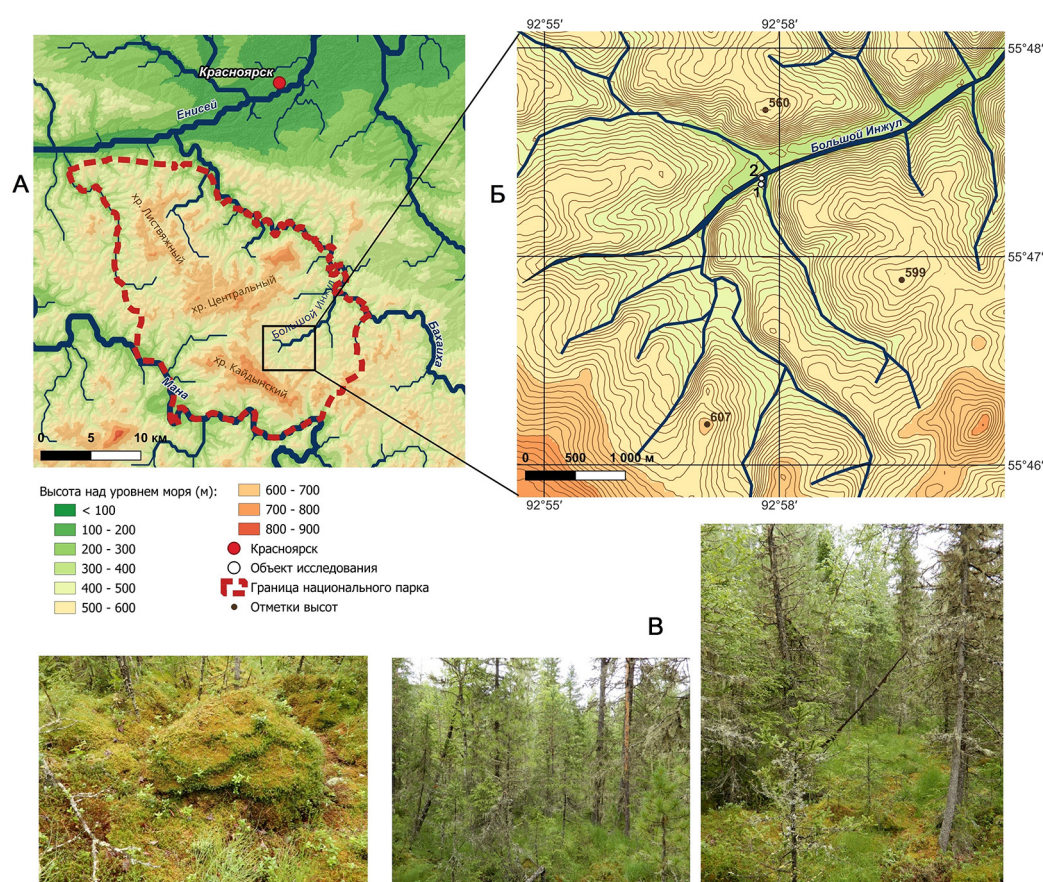


Рис. 1. Месторасположение объекта исследования: (А) – положение изучаемого района в границе национального парка «Красноярские Столбы»; (Б) – месторасположение изученных разрезов: 1 – «Большой Инжул-1», 2 – «Большой Инжул-2»; (В) – ельник заболоченный бруснично-клюквенно-сфагновый в долине р. Большой Инжул. Фото А.Е. Барабанцовой. Карта построена с помощью геоинформационной системы QGIS 3.32.3-Lima О.В. Подобуевой

Fig. 1. Study area location: (A) Position of the study site within the boundaries of the "Krasnoyarskie Stolby" National Park; (B) Location of the studied profiles: 1 – "Bolshoy Inzhul-1", 2 – "Bolshoy Inzhul-2"; (C) A boggy spruce forest with cowberry, cranberry, and sphagnum moss in the Bolshoy Inzhul River valley. Photo by A. E. Barabantsova. Map was created using QGIS 3.32.3-Lima (O. V. Podobueva)

нию с восточными областями здесь меньше неоген-четвертичные поднятия, эрозионный рельеф мягких очертаний, ледниковые формы рельефа редки. Манский район характеризуется платообразным, низкогорным рельефом, преобладает абсолютная высота – 650 м, относительная – 200 м, максимальная – 1877 м.

Территорию национального парка с северо-запада на юго-восток пересекает извилистая дуга основного водораздела. Он состоит из переходящих один в другой хребтов: Листвяжного, Центрального и Кайдынского. Самый южный из них – Кайдынский – простирается в юго-восточном направлении на 11 км. Этот хребет представляет собой типичный участок выровненной поверхности древнего пенеplena, его северо-восточный склон опускается к реке Базаихе покатыми, лесистыми склонами, расчлененными на ряд второстепенных блоков. Реки, стекающие с водораздельного хребта на северо-восток (р. Калтат, р. Намурт, р. Большой Инжул и р. Малый Инжул), имеют большую протяженность и меньшее падение, по сравнению с реками (притоки р. Мана) южного склона, который имеет больший уклон, сильно эродирован (Национальный парк «Красноярские Столбы» – официальный сайт: <https://kras-stolby.ru/territory/fiziko-geograficheskie-usloviya/>).

В геологическом строении наибольшее распространение на территории национального парка имеют породы рифея (40 %), венда (25 %) и ордовика (21 %) (Беляк, 1949). Местоположение болота Большой Инжул обусловлено локальным понижением местности (383 м над уровнем моря) и распространением, согласно (Геологическая карта СССР, 1958), менее устойчивых к выветриванию пород: известняков, песчаников, глинистых и кремнистых сланцев Манской свиты (Pt2mn). Район болота окружают более устойчивые породы: с востока кварцево-графитистые сланцы

с прослоями мраморов Жайминской свиты, с юга эффузивы основных пород (порфири-ты, диабазы, туфы (Pt2bh)) Бахтинской свиты, с севера нижнепалеозойские граниты, гранодиориты, сиениты, пироксениты и габбро. Манская и Бахтинская свиты относятся к Верхнепротерозойской эонотеке и Верхнерифейской эратеме. Жайминская свита, согласно серийной легенде карты, отнесена к Нижнепротерозойской эонотеке.

Климатические условия национального парка обусловлены географическим положением в центральной части Евразийского материка: удаленностью от морей и океанов, настыке двух областей – Восточно-Сибирской (центр холода) и Западно-Сибирской, подверженной влиянию северо-атлантических зимних циклонов. Многолетние данные метеостанции «Столбы» (532 м н.у.м.) характеризуют климат как более холодный, влажный и менее континентальный, чем климат в районе г. Красноярска. В течение года в горно-таежном поясе нацпарка выпадает 686 мм осадков. Большая их часть приходится на зиму – 31,3 %, летом выпадает – 27 %, весной – 22,7 %, осенью – 19 %. Устойчивый снежный покров лежит в среднем 124 дня; его средняя мощность – 94 см (Фокина и др., 2006; Физическая география..., 2016). За последние 20 лет среднегодовая температура воздуха составила $0,8 \pm 0,2$ °C, что на 2 °C выше данных прошлого века. Средняя температура января $-15,5 \pm 4,0$ °C, а июля $+17,5 \pm 1,8$ °C (Летопись природы..., 2023). В районе исследования, по данным установленных автономных метеодатчиков НОВО U-32, среднегодовая температура воздуха ниже и составляет $-0,3 \pm 12,8$ °C, а количество осадков меньше на 25 % в сравнении с горной тайгой.

Вертикальное зонирование климатических условий приводит к дифференциации растительного и почвенного покровов.

В поясе горной темнохвойной тайги на высотах 500–800 м наиболее распространены горно-подзолистые почвы, а в низкогорном поясе (на высотах от 200 до 500 м) под пологом лиственнично-светлохвойных пород преобладают горные серые лесные почвы. Для почв данного района, в отличие от аналогичных почв равнинных территорий, характерны малая мощность, щебнистость, слабая дифференцированность на генетические горизонты, слабое развитие застойного заболачивания, отсутствие явлений засоления (Коляго, 1961).

Согласно ландшафтно-лесотипологической структуре (Назимова и др., 2010), водосборный бассейн р. Большой Инжул расположен в низкогорной подтайге с развитым комплексом долинных лиственнично-пихтово-еловых лесов. Повышенное проточное увлажнение в долинах создает условия для развития ельников, в отличие от склонов, где бедность почвообразующих пород недопускает распространения темнохвойных лесов, даже в условиях повышенного увлажнения климата достаточного для роста пихты и кедра. На световых склонах преобладают подтаежные сосняки осочково-разнотравные, на теневых – осочково-, кустарничково- и мелкотравно-зеленомошные смешанные темнохвойно-сосновые и лиственничные фации.

Материалы и методы

Объект исследования – торфяные отложения болота, расположенного в междуречье истоков р. Большой Инжул.

Расположение и площадь участка определялись геопозиционированием на местности с помощью GPS-навигатора в системе WGS 84. С помощью металлического щупа выполнено определение мощности торфяной толщи. Для расчета объема торфяной залежи и площади болота использовалась ГИС-программа с открытым исходным кодом

Quantum GIS (2023). С помощью процедуры геопространственной интерполяции с использованием метода обратных взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW) рассчитывалась глубина пикселя по всей площади болота. Зная глубину и площадь пикселей размером 3×5 м, был рассчитан объем исследуемого объекта. Установлено, что площадь болота составляет 9592 м², объем торфяной толщи – 7806 м³.

Современная растительность на болоте представлена ельником заболоченным бруснично-клюквенно-сфагновым с участием осок, хвощей и присутствием в древостое других пород (5ЕЗБ1Л1С+К). Возраст хвойных около 80 лет, сомкнутость основного полога – 0,4. Существенно представлен подрост (6Е2К2П+С, Б) и подлесок из смородины (*Ribes nigrum* L.), спиреи (*Spiraea media* Schmidt.), жимолости алтайской (*Lonicera altaica* Pall.), нескольких видов ив (*Salix caprea* L., *Salix viminalis* L. и др.), черемухи (*Padus avium* Mill.) и рябины (*Sorbus sibirica* Hedl.). Микрорельеф кочковатый, с небольшой долей (до 1 %) естественного валежника.

В живом напочвенном покрове доминируют брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), клюква (*Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.) и сфагновые мхи (*Sphagnum* sp.). Редко представлены виды разнотравья, боровые, таяжные и виды заболоченных местообитаний. В травяно-кустарничковом ярусе также значительно участие хвоща лесного (*Equisetum sylvaticum* L.) и осоки (*Carex cespitosa* L. и *Carex* sp.). Остальные виды яруса представлены редко: звездчатка Бунге (*Stellaria bungeana* Fenzl.), грушанка зеленоцветная (*Pyrola chlorantha* Sw.), герань крылова (*Geranium krylovii* Tzvelev), ясколка (*Cerastium* sp.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), седмичник европейский (*Trientalis europaea* L.), костяника хмеле-

листная (*Rubus humulifolius* C. A. Mey.), костяника каменистая (*Rubus saxatilis* L.), линнея северная (*Linnaea borealis* L.), сердечник крупнолистный (*Cardamine macrophylla* Willd.), черника (*Vaccinium myrtillus* L.), ожика волосистая (*Luzula pilosa* (L.) Willd.), подмаренник цепкий (*Galium aparine* L.), хвощ камышовый (*Equisetum scirpoides* Michx.), хвощ зимующий (*Equisetum hyemale* L.), синюха голубая (*Polemonium coeruleum* L.), медуница мягчайшая (*Pulmonaria mollis* Wulfen ex Hornem.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt.), иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), калужница болотная (*Caltha palustris* L.), ортилия однобокая (*Orthilia secunda* (L.) House), грушанка круглолистная (*Pyrola rotundifolia* L.), бор развесистый (*Milium effusum* L.).

В моховом покрове преобладает *Sphagnum fuscum* (Schimp.) H. Klinggr., *Sph. warnstorffii* Russow и *Sph. capillifolium* (Ehrh.) Hedw., в меньшем количестве отмечены *Sph. rubellum* Wilson, *Sph. divinum* Flatberg & K. Hassel (ранее *Sph. magellanicum* Brid.). Менее 5 % приходится на зеленые мхи: *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., *Polytrichum juniperinum* Hedw., *Dicranum bergeri* Blandow ex Hoppe., *Ptilium crista-castrensis* (Hedw.) De Not., *Pohlia cruda* (Hedw.) Lindb., *Amblystegium serpens* (Hedw.) Bruch et al., *Rhizomnium punctatum* (Hedw.) T.J. Kop., *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, *Plagiomnium ellipticum* (Brid.) T.J. Kop., *Breidleria pratensis* (W.D.J.Koch ex Spruce) Loeske, *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al., *Plagiomnium drummondii* (Bruch et Schimp.) T.J. Kop., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr., *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske, *Helodium blandowii* (F. Weber & D. Mohr) Warnst. Большинство мхов исследуемого болотного массива являются распространенными и обычными видами, за исключением

Sphagnum rubellum, который, согласно литературным данным (Васильев, 2003), на территории Восточного Саяна относится к редким видам. Большое участие в формировании облика биоценоза играют эпифитные лишайники рода *Usnea*, присутствуют также *Lobaria* sp., *Cladonia* sp.

На болоте отобрано две колонки: 1) «Большой Инжул-1» общей мощностью 2,13 м в точке с координатами 55°47'19.0" с.ш., 92°57'33.9" в.д., абсолютная отметка высоты – 384 м; 2) «Большой Инжул-2» мощностью 1,78 м отобрана ближе к урезу реки в точке с координатами 55°47'19.0" с.ш., 92°57'30.2" в.д., абсолютная отметка – 383 м. Верхняя часть отложений (0,9 м) отбиралась монолитом при шурфовке, нижняя с использованием пробоотборника фирмы Eijkelkamp. Интервал отбора образцов для комплексного палеоэкологического анализа – 1 см, проанализирован каждый третий образец, 72 и 60 проб соответственно из первого и второго разреза. Для радиоуглеродного датирования пробы взяты через 20–40 см с учетом строения толщи.

Описание растительного покрова выполнено по стандартной методике согласно (Сукачев, Зонн, 1961). Сбор и определение гербарного материала проводились по классическим методикам (Савич-Любичкая, Смирнова, 1968; Бардунов, 1969) с использованием микроскопа AxioStar (Carl ZEISS) и определителей (Игнатов, Игнатова, 2003; Флора мхов России, 2020, 2022).

Пробы торфа и органоминеральных отложений изучены комплексом методов: ботанический анализ торфа (Куликова, 1974; Торфяные месторождения..., 1977); палеоантракологический анализ (Clark, 1988); определение зольности торфа (ГОСТ 11306–2013, 2019); гранулометрический состав минеральных отложений из подошвы разреза опреде-

лялся в соответствии с методом Н. А. Качинского (1958).

При подготовке к ботаническому анализу пробы торфа кипятили в течение 10 минут в 10 % растворе NaOH, промывали под струей горячей воды через сито с диаметром ячейки 0,25 мм. Микроскопирование осуществлялось при помощи светового микроскопа Микромед-3 при увеличении $\times 200$. Для определения видовой принадлежности растительных остатков использовались атласы (Домбровская и др., 1959; Кац и др., 1977).

Для палеоантракологического анализа из каждого третьего сантиметрового интервала была отобрана осредненная проба объемом 1 см³. Лабораторный этап включал пробоподготовку по стандартной методике (Clark, 1988), с предварительной обработкой 5 % раствором пирогенфосфата натрия (Na₂P₂O₇) и 6 % перекисью водорода (H₂O₂). Подсчет частиц угля проведен при увеличении $\times 20$,

учитывались все частицы крупнее 125 мкм. Выявленное количество угольков в каждом временном интервале и полученный с помощью глубинно-возрастной модели калиброванный интерполированный возраст были проанализированы алгоритмом, предложенным Higuera (2009) в пакете «tapas» среды R (Finsinger, Bonnici, 2022). Параметры для расчетов следующие: для интерполяции использовался временной отрезок 15 лет; метод сглаживания данных – функция локальной взвешенной регрессии с робастными весами (Robust LOWESS) со сглаживающим интервалом в 1500 лет; тип пороговых значений – локальный; вероятность, при которой отсекаются минимальные значения CHAR – 0,05; временной интервал, использовавшийся для сглаживания данных расчёта межпожарных интервалов – 150 лет.

Радиоуглеродный анализ (табл.) проведен методом AMS в Лаборато-

Таблица. Результаты AMS ¹⁴C датирования торфяных отложений болота Большой Инжол

Table. Results of AMS ¹⁴C dating of peat deposits from the Bolshoy Inzhul mire

Лабораторный номер образца	Материал для датирования	Глубина, см	Радиоуглеродный возраст, лет назад	Калиброванный возраст, лет назад 95,4 (2 σ)
«Большой Инжол-1» (2,13 м)				
ИМКЭС- ¹⁴ C2945	Торф	30–32	200±90	423 (403–443)
ИМКЭС- ¹⁴ C2930	Торф	40–42	420±90	630 (593–667)
ИМКЭС- ¹⁴ C2932	Торф	62–64	910±90	1178 (997–1359)
ИМКЭС- ¹⁴ C2940	Торф	72–75	1940±110	2401 (1962–2841)
GV-4758	Оторфованный суглинок	160–162	6177±29	7112 (7092–7133)
GV-4759	Оторфованный суглинок	190–192	6214±29	7375 (7242–7508)
GV-4760	Суглинок	210–213,5	7054±31	8166 (7909–8424)
«Большой Инжол-2» (1,78 м)				
ИМКЭС- ¹⁴ C2925	Торф	38–40	405±90	587 (544–631)
ИМКЭС- ¹⁴ C2926	Торф	60–63	840±90	1303 (910–1696)
ИМКЭС- ¹⁴ C2928	Торф	80–83	2835±110	3172 (3030–3314)

Таблица. Продолжение

Table. Continued

Лабораторный номер образца	Материал для датирования	Глубина, см	Радиоуглеродный возраст, лет назад	Калиброванный возраст, лет назад 95,4 (2 σ)
ИМКЭС- ¹⁴ C2929	Торф	88–90	3265±145	3837 (3742–3933)
GV-4753	Торф	112–113	4043±27	4747 (4704–4791)
GV-4754	Оторфованный суглинок	117–118	5149±27	5868 (5773–5963)
GV-4755	Оторфованный суглинок	126–127	5337±28	6259 (6231–6288)
GV-4756	Оторфованный суглинок	145–147	6362±30	7703 (7363–8044)
GV-4357	Глина	167–169	8173±32	9522 (9216–9829)

рии изотопных исследований ЦКП “Геохронология кайнозоя” Института археологии и этнографии СО РАН и ЦКП “Ускорительная масс-спектрометрия” НГУ-ННЦ; и жидкостно-сцинтилляционным методом с помощью спектрометра-радиометра Quantulus в ТомЦКП ИМКЭС СО РАН. Калибровка радиоуглеродных дат и построение глубинно-возрастной модели выполнены

по калибровочной кривой IntCal20 в пакете “Bchron” среды R (Reimer et al., 2020) (рис. 2).

Результаты

*Ботанический анализ,
гранулометрический состав и зольность*

По результатам анализа растительных макрофоссилий установлено, что торфяная залежь переходного типа, лесо-топяного

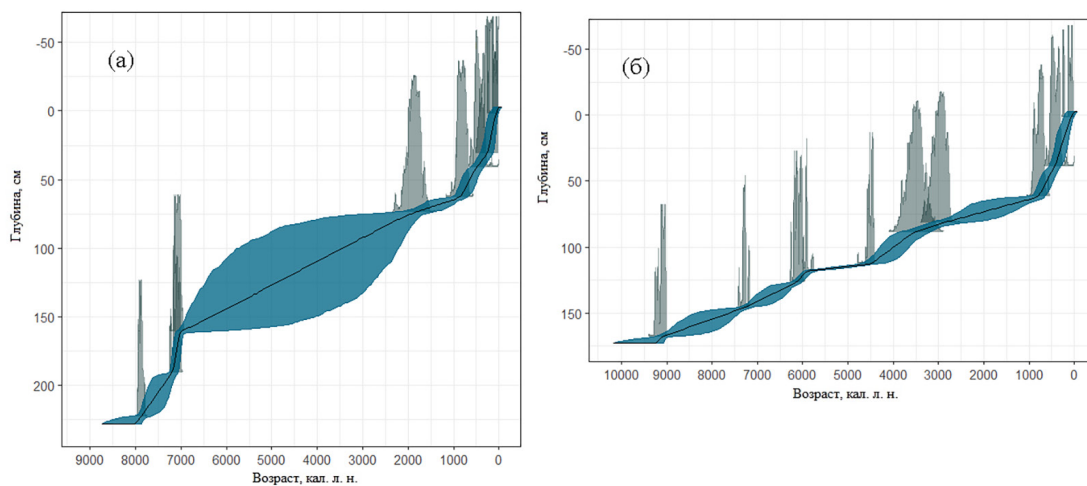


Рис. 2. Модель вертикального прироста торфа для отложений из разреза (а) – «Большой Инжул-1», (б) – «Большой Инжул-2», рассчитанная в пакете “Bchron” среды R (Reimer et al., 2020)

Fig. 2. Age-depth model of peat accumulation rates for (a) the “Bolshoy Inzhul-1”, (b) the “Bolshoy Inzhul-2”, generated with the Bchron package in R statistical software (Reimer et al., 2020)

подтипа. Подстилающие торф органоминеральные отложения включают макроостатки смешанного пихтово-елового с кедром, сосной и березой папоротниково-хвощово-зеленомошного леса. Нижняя часть торфяной толщи сложена сосновым торфом, верхняя – сфагновым мезотрофным.

Разрез «Большой Инжул-1» имеет следующее сложение снизу вверх:

1. Органоминеральные отложения (2,13–1,98 м; 8,2–7,5 тысячи калиброванных лет назад (тыс. кал.л.н.)) представлены средним суглинком. Среднее значение зольности – 78,7 %. Включения растительных макроостатков идентифицированы как: кора *Abies* и *Picea* (преобладает), ткани зеленого мха (обильно), ткани хвоща и сфагнового мха (единично) (рис. 3).

2. Оторфованный суглинок (1,98–1,33 м; 7,5–5,4 тыс. кал.л.н.). Среди выделенных из слоя растительных остатков преобладает кора и древесина, основной доминант – *Picea* (до 65 %), *Pinus sylvestris* (в среднем 20 %) и *Abies* (10–15 %), *Larix* – 5–10 %, *Betula sect. Albae* – до 5 %. Слой в интервале глубин 1,75–1,74 м (около 7,1 тыс. кал.л.н.) включает литоморфы (дресва 0,5–0,7 см). В интервале 1,48–1,33 м (6,3–5,4 тыс. кал.л.н.) в составе макроостатков отмечается сокращение коры *Picea*, появляется кора *Pinus sibirica* (до 25 %), участие *Pinus sylvestris* возрастает до 30 %. В слое 1,36–1,34 (около 5,5 тыс. кал.л.н.) отмечен пик зольности – 75,4 %.

3. Сосновый торф (1,33–0,73 м; 5,4–2,4 тыс. кал.л.н.). Волокно торфа на 65–100 % представлено макрофоссилиями *Pinus sylvestris*. В интервале 1,18–1,02 м (4,5–3,6 тыс. кал.л.н.) содержание *Abies* составляет 15–25 %. В слое 1,02–0,93 м (3,6–3,2 тыс. кал.л.н.) доля *Betula sect. Albae* – 10 %.

4. Древесно-сфагновый торф (0,73–0,63 м; 2,4–1,2 тыс. кал.л.н.), в составе тор-

фяного волокна происходит сокращение древесных остатков и резкое увеличение доли сфагнового мха, встречаются ткани вересковых. В интервале 0,69–0,63 м (1,4–1,2 тыс. кал.л.н.) доля представителей сем. *Ericaceae* достигает 20–30 %.

5. Сфагновый мезотрофный торф (0,63–0 м; 1,2 тыс. кал.л.н. – настоящее время) основной доминант – сфагновый мох.

Разрез «Большой Инжул-2», расположенный ближе к урезу реки, на абсолютной отметке 383 м, включает следующие горизонты снизу вверх:

1. В подошве изученных отложений (1,78–1,47 м; ≈ 9,8–7,7 тыс. кал.л.н.) залегает грунт тяжело-суглинистый – легко-глинистый, зольность в среднем составляет 84,5 %. Отмечены немногочисленные включения растительных макрофоссилий, среди которых преобладает кора *Picea*, относительно обильна *Abies*, меньше содержание коры *Pinus sylvestris*, тканей зеленого и сфагнового мха, единично хвощ, папоротник, осока. В каждом образце данного слоя единично отмечена водоросль *Spirogyra* – индикатор мелководного застойного водоема (van Geel, 1978).

2. Оторфованный суглинок (1,47–1,13 м; 7,7–4,7 тыс. кал.л.н.). Средняя зольность – 74,7 %, в интервале 1,15–1,13 м (5,4–4,7 тыс. кал.л.н.) зольность составила 78 %. Среди растительных макроостатков доминируют древесные, преобладает кора *Picea*. Начиная с интервала глубин 1,27–1,26 м (примерно 6,1 тыс. кал.л.н.) возрастает доля коры *Pinus sylvestris*, а участие *Picea* сокращается (рис. 4).

3. Торф сосновый (1,13–0,82 м; 4,7–3,2 тыс. кал.л.н.), высокой степени разложения, зольность – 38,7 %. Волокно торфа на 60–65 % образовано тканями *Pinus sylvestris*, содержание вересковых – 10–20 %, березы – 5–10 %, ткани хвоща и папоротника по 5–10 % каждый. В ин-

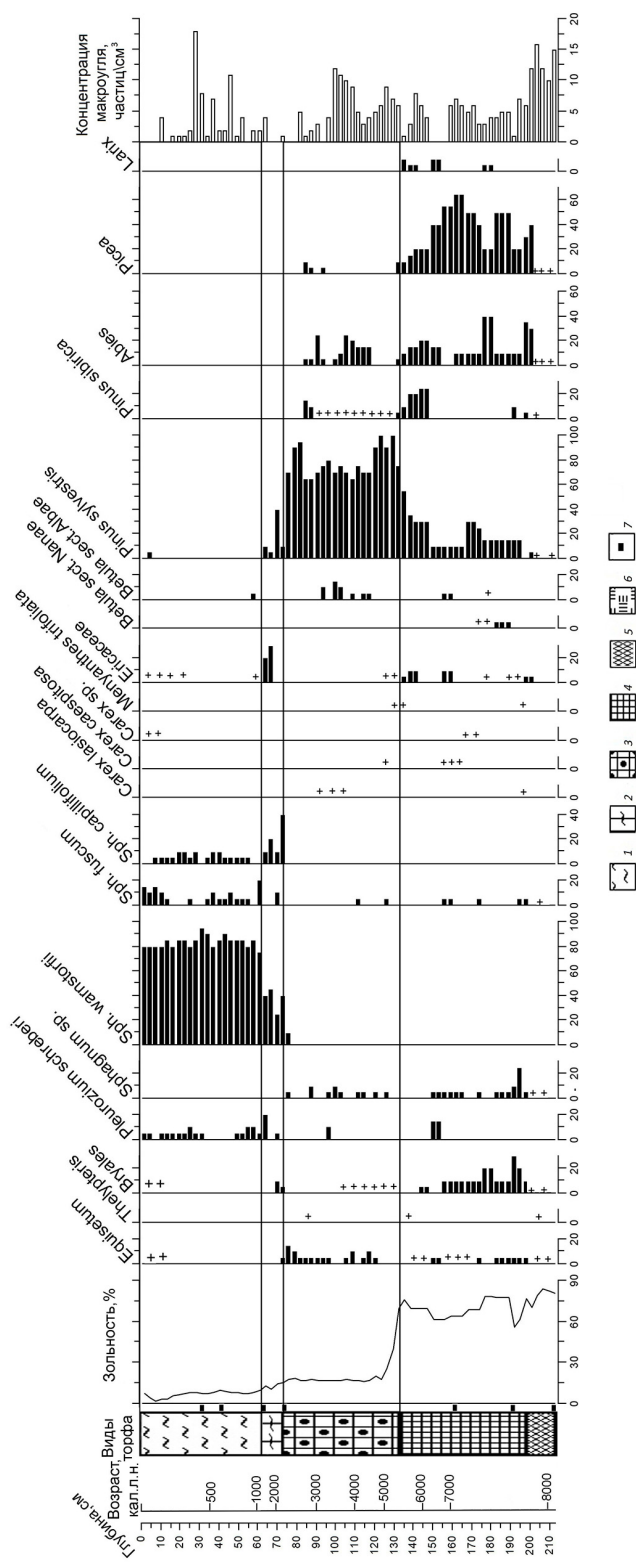


Рис. 3. Стратиграфия разреза «Большой Инжул-1», динамика растений-торфообразователей, зольность отложений, концентрация частиц макроугля. Условные знаки. Виды торфа (1–3): 1 – сфагновый мезотрофный, 2 – древесно-сфагновый, 3 – сосновый; 4 – оторфованный суглинок, 5 – средний суглинок с включением детрита, 6 – тяжелый суглинок с включением детрита; 7 – интервал отбора пробы на датирование

Fig. 3. Stratigraphy of the "Bolshey Inzhul-1" section, showing peat-forming plant community dynamics, ash content, and macroscopic charcoal particle concentrations. Legend: Peat types (1–3): 1 – Mesotrophic sphagnum peat 2 – Woody-Sphagnum peat 3 – Pine peat 4 – Peaty loam 5 – Loam with detrital inclusions 6 – Heavy loam with detrital inclusions 7 – Sampling interval for dating

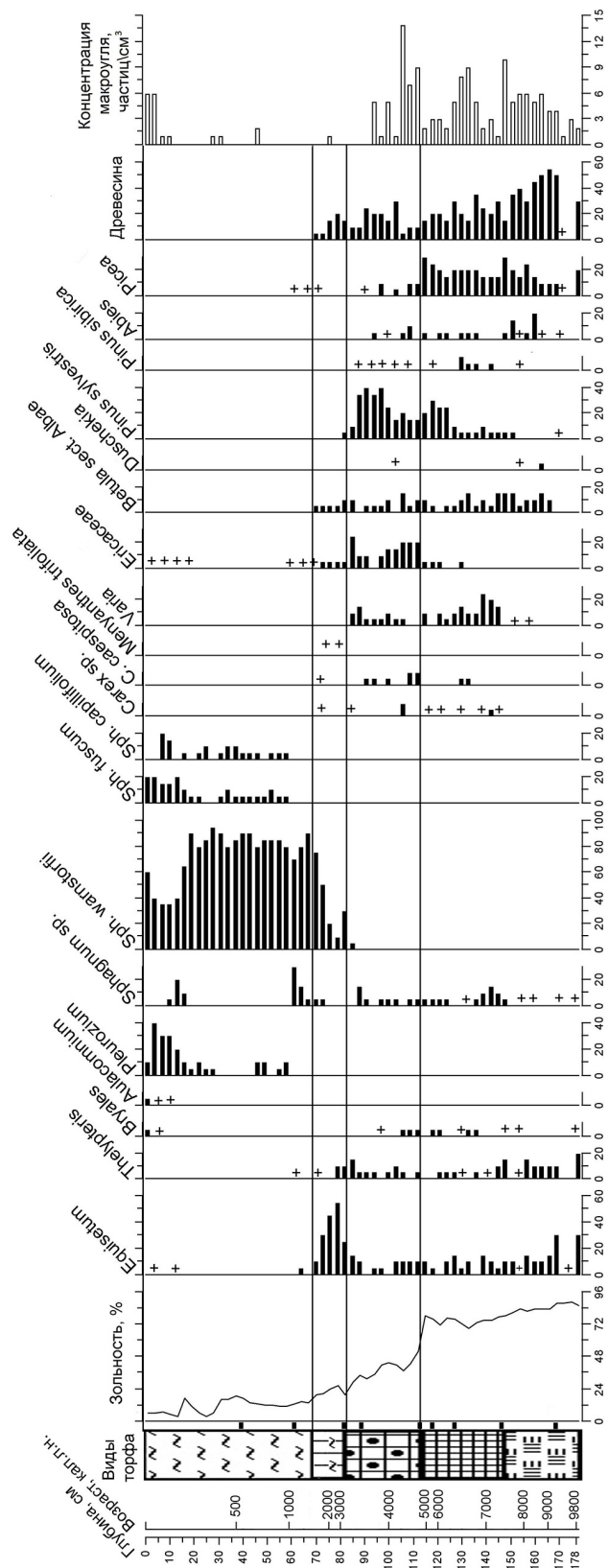


Рис. 4. Стратиграфия разреза «Большой Инжул-2», динамика растений-торфообразователей, зольность торфа, содержание частиц макроугля. Условные знаки см. на рис. 3

Fig. 4. Stratigraphy of the "Bolshey Inzhul-2" section, showing peat-forming plant community dynamics, peat ash content, and macroscopic charcoal particle concentrations. For legend details, see Fig. 3

тервале 1,09–0,93 м (4,4–3,9 тыс.л.н.) отмечены включения макроостатков *Abies* (5–10 %).

4. Торф древесно-сфагновый (0,82–0,69 м; 3,2–1,6 тыс. кал.л.н.), зольность – 22 %. Содержание древесных постепенно снижается от 35 до 10 %, в составе торфяного волокна появляется и возрастает доля сфагнового мха. Обильно отмечены остатки хвоща, максимум 45–55 % в интервале 0,79–0,75 м (3,0–2,2 тыс. кал.л.н.).

5. Сфагновый мезотрофный торф (0,69–0,0 м; 1,6 тыс. кал.л.н. – настоящее время) волокно торфа на 90–100 % сложено сфагновым мхом (*Sphagnum warnstorffii*, *Sph. fuscum*, *Sph. capillifolium*). Начиная с 0,3 м (последние 400 лет) наряду со сфагновым мхом отмечается небольшое, но стабильное участие зеленого мха, содержание которого в волокне торфа достигает 30–40 % (доминирует *Pleurozium*). Зольность торфа в среднем – 11 %. В интервале 0,3–0,4 м (примерно 400–500 л.н.) зольность увеличилась до 16–18 %, и в слое 0,15–0,16 м (около 300 л.н.) – до 17 %.

Палеоантракологический анализ

Содержание частиц макроугля в отложениях болота Большой Инжул невысокое, максимальная концентрация – 18 частиц/см³ (рис. 3). В подстиляющем торф суглинке частицы макроугля присутствуют во всех образцах, наибольшая наполненность проб приходится на интервал 2,13–2,01 м – 12–16 частиц/см³ «Большой Инжул-1», и 1,48–1,47 м – 10 частиц/см³ в «Большой Инжул-2».

В торфяном слое количество угольков в среднем от 0 до 5 частиц/см³, значение более 10 частиц/см³ зафиксировано в разрезе «Большой Инжул-1» в интервалах: 28–26 см, 49–48 см, 104–96 см; в разрезе «Большой Инжул-2» в слое 106–103 см.

Полученные с помощью пакета *tapas* схемы (рис. 5, 6) демонстрируют скорость ак-

кумуляции макроскопических частиц угля, локальные пожарные эпизоды и интервалы повторения пожаров в заданном временном отрезке.

В разрезе «Большой Инжул-1» пожарные эпизоды (“+” на рис. 5, 6), которые отражают первичное отложение 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, выявлены в следующие даты: 7,8, 7,6, 7,1, 6,8, 6,2, 6,0, 5,8, 4,9, 3,7, 3,6, 3,5, 2,2 тыс. кал.л.н. (рис. 5), скорость аккумуляции в среднем составляет 0,5 частиц/см² в год. Последние 800 лет включают 6 пожарных пиков, максимальная скорость аккумуляции частиц угля (3 частиц/см² в год) выпадает на данный интервал.

В разрезе «Большой Инжул-2» выделено 11 локальных пожарных эпизодов: 9,7, 8,9, 7,8, 6,6, 6,2, 4,4, 4,0, 3,7 тыс. кал.л.н. и примерно 600, 500 и 100 лет назад, т.е. в это время распространение пожаров было максимально близким к точке исследования. Пожарные эпизоды в интервале 4,4–3,7 тыс. кал.л.н. отличаются наибольшей скоростью аккумуляции частиц макроугля для данной колонки – 0,3 частиц/см² в год. На последние 600 лет выпало три пожарных события, со скоростью аккумуляции частиц макроугля около 0,25 частиц/см² в год, с небольшим межпожарным интервалом (рис. 6).

Обсуждение результатов

Совокупность полученных палеосигналов дает возможность рассмотреть ход развития природных условий в Манском районе Восточного Саяна за большую часть голоцена.

Около 9,8–7,7 тыс. кал.л.н. в верховье реки Большой Инжул на месте современного болота шло накопление тяжело-суглинистых – легко-глинистых отложений, что может

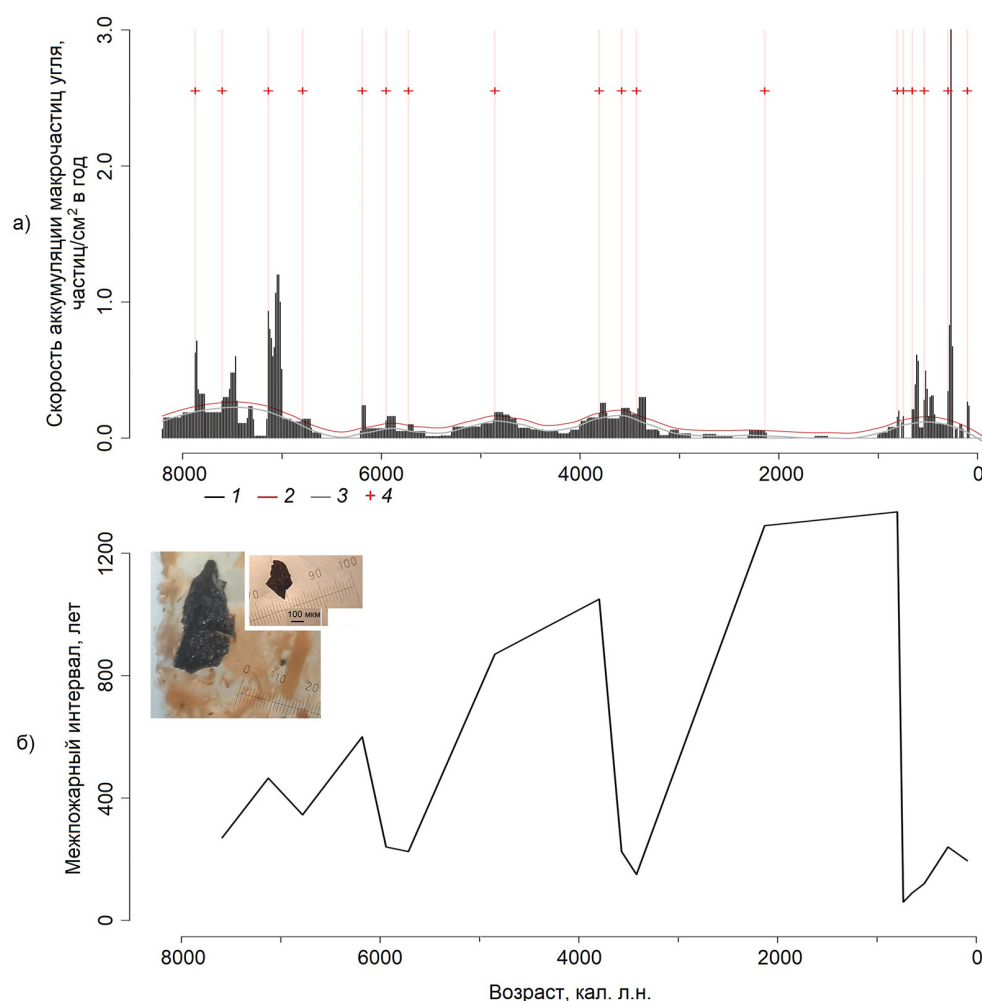


Рис. 5. Скорость аккумуляции макроскопических частиц угля, распределение локальных пирогенных эпизодов и график межпожарных интервалов по данным анализа частиц макроугля из отложений разреза «Большой Инжул-1». Фото макроскопических частиц угля.

Условные знаки: 1 – интерполированные значения скоростей аккумуляции угля, 2 – пороговые значения, 3 – фоновые значения, 4 – локальные пожарные эпизоды

Fig. 5. Macrocharcoal accumulation rates, distribution of local fire episodes and fire return intervals based on macroscopic charcoal particle analysis (the “Bolshoy Inzhul-1” peat section). Macro-charcoal particles are shown in photographs.

Legend: 1 – Interpolated charcoal accumulation rates 2 – Threshold values for fire detection 3 – Background charcoal levels 4 – Identified local fire episodes

отражать развитие пойменной фации. Включение макроостатков *Abies*, *Picea* и единичное *Pinus*, зеленого мха и хвоща может указывать на развитие в долине реки смешанного пихтово-елового с кедром и сосной хвощово-зеленомошного леса. По результатам палеогеографических исследований, проведенных

в смежных районах, установлено, что данный период характеризовался ослаблением суровости климата и изменением региональной тепло- и влагообеспеченности в сторону роста летних температур и увеличения продолжительности безморозного периода (Макаров и др., 1995; Демиденко, Хижняк, 2018). Зна-

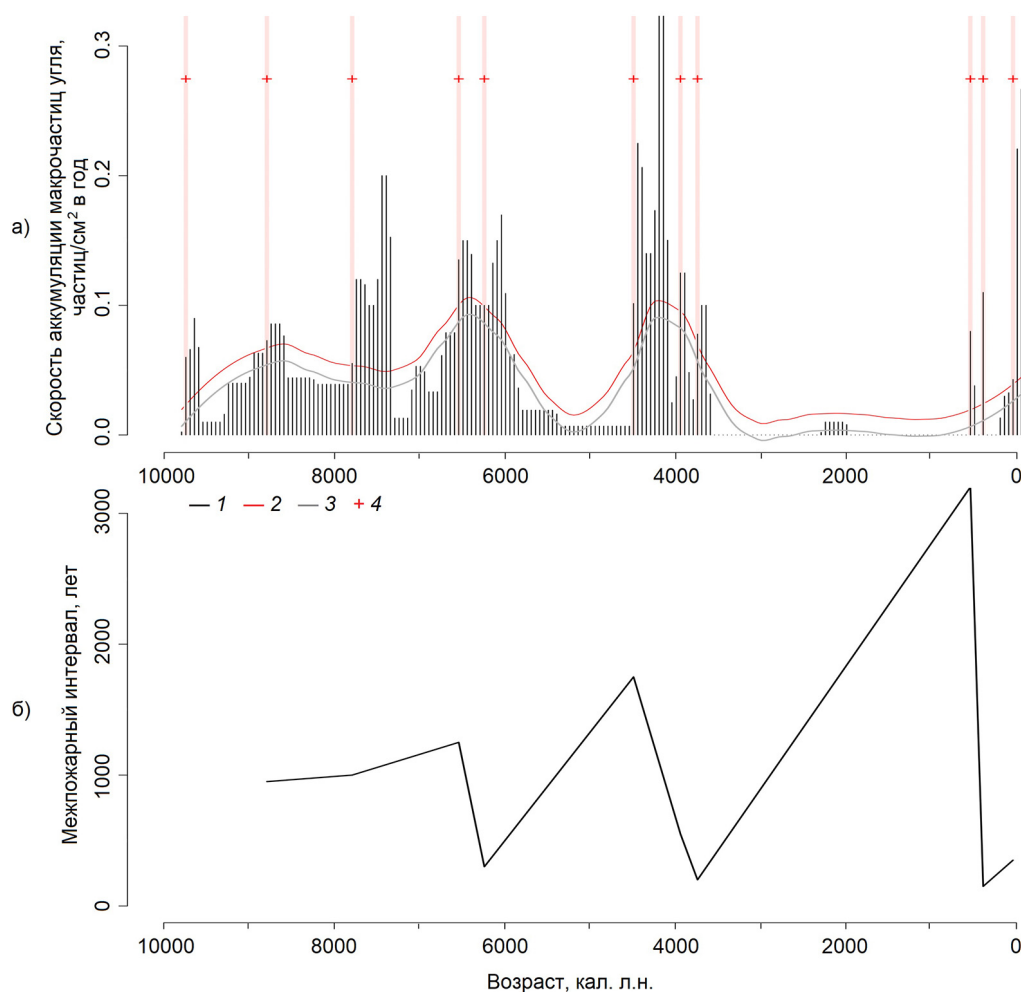


Рис. 6. Скорость аккумуляции макроскопических частиц угля, распределение локальных пирогенных эпизодов и график межпожарных интервалов по данным анализа частиц макроугля из отложений разреза «Большой Инжул-2». Условные знаки см. на рис. 5

Fig. 6. Macrocharcoal accumulation rates, distribution of local fire episodes and fire return intervals based on macroscopic charcoal particle analysis (the "Bolshoy Inzhul-2" peat section). For legend details, see Fig. 5

чительное участие пихты в составе древесного яруса сообществ лесостепи и подтайги (Демиденко, Котенева, 2012; Mikhailova et al., 2021; Grenaderova et al., 2024) свидетельствует о теплых и достаточно влажных условиях (Поликарпов, 1970; Крылов и др., 1986) в это время.

Начиная с 7,7–7,5 тыс. кал.л.н. происходит накопление оторфованного суглинка. Можно предположить, что смена седиментации и усиление пожарной активности (по-

жарные эпизоды около 7,7–7,4 тыс. кал.л.н., 7,2–6,8 тыс. кал.л.н., 6,1–5,8 тыс. кал.л.н.) стали следствием термического максимума голоцена 8,2–5,7 тыс. кал.л.н. (Хотинский, 1977; Новенко, 2021). Реакция на потепление и усиление аридизации в это время отчетливо фиксируется в палеоархивах смежных районов, например, в виде индикаторов резкого сокращения площади темнохвойных лесов (Tarasov et al., 2007; Безрукова и др., 2011; Шарова и др., 2015), обмеления и за-

растания озер (Mikhailova et al., 2021), активизации пожарного режима (Карпенко и др., 2022; Grenaderova et al., 2024, 2025; Shatunov et al., 2024), широкого распространения сосны в зоне сплошной многолетней мерзлоты (Безрукова и др., 2017).

В слое, накопившемся 7,2–7,1 тыс. кал.л.н., выявлена прослойка с включением дресвы, что может указывать, с одной стороны, на усиление пролювиального сноса, а с другой – рассматриваться как увеличение скорости водного потока до 0,46 м/с, которое позволяло переносить частицы со средним размером 3,2 мм (Ревин, 1977: 98). Опираясь на полученный комплекс индикаторов, и на то, что литоморфы выделены на удалении от уреза (колонка «Большой Инжул-1»), предполагаем возможное усиление пролювиального сноса со склонов, пройденных пожарами.

Начало процесса торфонакопления в верховье р. Большой Инжул пришлось на начало неогляциала. На присклоновом участке возраст нижнего торфяного слоя составил – 5,4 тыс. кал.л.н., а ближе к урезу – 4,7 тыс. кал.л.н., причем слой толщи у уреза, сформированный за период 6,0–5,0 тыс. кал.л.н., имеет мощность всего 5 см и отличается повышенной зольностью (78 %), можно предположить, что он был частично размыт в период усиления речного влияния. Известно, что в этот период наблюдалось увеличение влажности в бассейне р. Кан, верхняя часть которого, так же как и бассейн р. Большой Инжул, располагается в Манском геоморфологическом районе Восточного Саяна. Так, сходный возрастной интервал (5680–5320 кал.л.н.) торфяной толщи болота Большое отличается гидрофильным составом макрофоссилий и непыльцевых палиноморф (*Menyanthes*, *Calamagrostis*, *Turbularia*, *Spirogyra*) (Гренадерова и др., 2024); а в отложениях болота Сосновка, накопившихся

в период 5,5–5,4 тыс. кал.л.н., в составе остатков малакофауны выявлено преобладание раковин водных моллюсков сем. Sphaeriidae и сем. Planorbidae (Grenaderova et al., 2024). В смежных районах исследователи отмечают расширение ареала темнохвойных и повышение уровня водных объектов (Krivonogov et al., 2012; Blyakharchuk, Chernova, 2013; Zhilich et al., 2017; Mikhailova et al., 2021). Согласно результатам изотопного анализа донных отложений озера Тере-Холь, период между ~5,2 и ~4,4 тыс. кал.л.н. был самым влажным интервалом в голоцене (Покровский, Панин, 2025). По данным (подкрепленным торий-урановым датированием) из Торгашинской пещеры, расположенной в 20 км севернее от исследуемого болота, короткие интервалы похолодания и снижение общей увлажненности наблюдались: $5,3 \pm 0,08 / -0,07$, $5,1 \pm 0,09$ и $4,85 \pm 0,05 / -0,06$ тыс.л.н. (Columbu et al., 2023).

Длительное время в верховье реки Большой Инжул развивалось лесное болото (согра). В сложении древесного яруса доминировала сосна, встречались ель, кедр, береза, в небольшом количестве присутствовала лиственница. В напочвенном покрове были распространены болотно-травно-осоковые сообщества. Отмечены такие влаголюбивые болотные растения, как: *Menyanthes trifoliata*, *Thelypteris palustris*, *Equisetum fluviatile*, *Comarum palustre*, *Carex caespitosa*, *C. appropinquata*. Болотные мхи (зеленый и сфагновый) представлены в небольшом количестве. Несколько большее участие сфагнового мха было характерно для присклонового участка. Встречались мезофильные кустарнички сем. Ericaceae (*Vaccinium vitis-idaea*, *Ledum palustre*), в кустарниковом ярусе присутствовала *Duscheckia*. Значимую роль в водно-минеральном питании болота имели полые речные воды. Зольность торфа ближе

к реке варьирует от 30 до 44 %, на удалении от уреза составляет 15–17 %.

В период от 4,4 до 3,6 тыс. кал.л.н. на болоте произрастала пихта (в волокне торфа содержание макроостатков достигает 10–25 %) – порода, требовательная к теплу, влажности и дренированности почв (Поликарпов, 1970). На интервал 4,4–4,2 и 3,9–3,5 тыс. кал.л.н. пришлось увеличение скорости аккумуляции частиц угля. Торф отличается повышенной степенью разложения. Пирогенных прослоек в изученных нами колонках на болоте Большой Инжул не выявлено, в отличие от разреза, описанного Л. В. Карпенко и А. А. Кнорре (2019), где зафиксировано наличие частиц обугленной древесины в интервале глубин 80–100 см (сведения о возрасте отсутствуют). По результатам палеокарпологического анализа (Кошкарлова и др., 2006) установлено, что в период 3600–3000 ^{14}C л.н. (слой с датой 3240 ± 90 ^{14}C л.н.) в растительном покрове болота Большой Инжул произрастали представители послепожарных сукцессий: малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), иванчай узколистный (*Chamerion angustifolium* (L.) Holub). И согласно палеоклиматической оценке, наблюдалось потепление зимнего периода на 1,5–2 °C, а теплого – на 2–4 °C, при снижении влагообеспеченности теплого периода на 150 мм. В целом данный временной интервал можно соотнести с суббореальным термическим максимумом (с 4,2 по 3,2 тыс. ^{14}C л.н.), который выделяется Н. А. Хотинским (1977) для Северной Евразии, или Этапом резких климатических изменений 4,2–3,8 тыс. кал.л.н. (3,6–3,5 тыс. ^{14}C л.н.), который имел глобальный характер и проявлялся по-разному (похолоданием, иссушением, потеплением) в разных частях земного шара (Ingolfsson et al., 1998; MacDonald et al., 2000; Van Geel et al., 2000; Mayewski et al., 2004; Борисова, 2014; Покровский, Панин, 2025).

Начиная примерно с 3000 кал.л.н. на болоте постепенно снижается облесенность, в живом напочвенном покрове большее развитие получают сфагновые мхи. Вероятно, по мере нарастания торфяной толщи произошло снижение водно-минерального питания, болото вышло из-под влияния речных вод, зольность торфа снизилась.

Около 2,2–2,1 тыс. кал.л.н. в отложениях присклонового разреза зафиксирован пожарный эпизод с небольшой скоростью аккумуляции угля (не более 0,3 частиц/см² в год), на участке около русла количество частиц угля не привысило пороговое значение (менее 0,1 частиц/см² в год) (рис. 6).

Аналогичный временной интервал в отложениях ранее изученного нами болота Сосновка, которое расположено примерно в 160 км к востоку от болота Большой Инжул (Grenaderova et al., 2024), характеризуется усилением пожарной активности. На период 2,2–1,8 тыс. кал.л.н. пришлось 3 пожарных эпизода, скорость аккумуляции угля составила около 2 частиц/см² в год. Т. А. Бляхарчук и М. А. Пупышева (Бляхарчук, Пупышева, 2022) по результатам изучения торфяника Малый Лабыш (490 м над у.м.) отмечают, что в Горной Шории в период 2300–2100 кал.л.н. леса горели реже всего, как в региональном масштабе, так и локально. С 2100 по 1900 кал.л.н. интенсивность локальных пожаров резко возросла, что совпадает с периодом снижения влажности климата, отмеченным в палеореконструкциях В. С. Волковой с соавт. (Волкова и др., 1989).

Около 1,6 тыс. кал.л.н. болото Большой Инжул перешло на топяную стадию развития, господствующее положение заняли сфагновые мхи. Преобладает мезотрофный вид *Sph. warnstorffii*, в меньшем количестве отмечен олигомезотроф *Sph. capillifolium* и олиготрофный вид *Sph. fuscum*, остальные виды

мха фиксируются в волокне торфа в малом количестве. Доля зеленого мха в указанный временной интервал невысока (5–10 % в волокне торфа). Усиление участия зеленого мха (*Pleurozium schreberi*, *Aulacomnium palustre*, *Tomentypnum nitens*) в составе напочвенного покрова наблюдается последние примерно 200 лет (до 40 % в торфяном волокне). Относительно недавно (возраст ели 80 лет) на болоте начал развиваться ельник бруснично-клюквенно-сфагновый.

Полученные нами данные коррелируют с результатами палеоботанических реконструкций, выполненных ранее по болоту Большой Инжул В. Л. Кошкаровой, А. Д. Кошкаровым и В. Г. Кольцовой (2006), Л. В. Карпенко и А. А. Кнорре (2019). Некоторые различия в составе восстановленных болотных сообществ, например в обилии травянистого яруса, можно объяснить мозаичностью растительного покрова, а также разными методами изучения торфяной толщи.

Последние 600 лет характеризуются усилением пожарной активности, отмечено несколько пожарных эпизодов, однако скорость аккумуляции частиц угля в основном не превышает 1 частиц/см² в год. По сравнению с изученными нами ранее разрезами в равнинной и горной тайге, в экотоне тайга-лесостепь, где скорость аккумуляции достигала 3–10 частиц/см² в год (Пронович, Гренадерова, 2021; Гренадерова и др., 2021, 2023, 2024; Подобуева и др., 2023; Mikhailova et al., 2024; Grenaderova et al., 2024, 2025), Инжульская местность отличается наименьшими значениями. На наш взгляд, низкая концентрация частиц угля в отложениях болота Большой Инжул может быть обусловлена более высокой влажностью в северо-западной части Восточного Саяна, открытой в сторону влажных воздушных потоков западного переноса, что препятствует распространению пожаров.

Д. Ю. Рогозин с соавторами (Рогозин и др., 2023b) обращают внимание, что тренд к современному увеличению угольных частиц в отложениях болот и озер присутствует не везде и не всегда обусловлен антропогенной нагрузкой. Для районов, исключая хозяйственную деятельность, имеются примеры как нарастающей пожарной активности за последнее столетие (например, плато Путорана, Novenko et al., 2022), так и противоположной, т.е. безопасной пожарной ситуации (например, оз. Заповедное, оз. Чеко, Рогозин и др., 2022; оз. Суздалево, Рогозин и др., 2023b). Для предгорья Северного Алтая установлено, что последние 1000 кал.л. интенсивность пожаров снижается и к настоящему времени достигла минимального значения (Pupysheva, Blyakharchuk, 2024).

Заключение

Впервые для территории национального парка «Красноярские Столбы» был использован анализ макроскопических частиц угля из болотных отложений, что в совокупности с малым интервалом отбора проб и детальным датированием позволило проследить ход и интенсивность пожарных событий за большую часть голоцена.

Установлено, что усиление пожарной активности в низкогорье западной части Восточного Саяна отмечалось 7,7–7,4, 7,2–6,8, 6,1–5,8, 4,9, 4,5–3,4, 2,2–2,1 тыс. кал.л.н. и последние 600 лет. Скорость аккумуляции частиц макроугля невысока и в среднем не превышает 0,5 частиц/см² в год. Максимальная скорость (1–1,2 частиц/см² в год) отмечена в термический максимум голоцена (около 7,2–7,0 тыс. кал.л.н.), а также около 250–200 кал.л.н.— 3 частиц/см² в год. В среднесуббореальный максимум (4,2–3,8 тыс. кал.л.н.) пожарная ситуация характеризовалась небольшим межпожарным интервалом (около

200 лет), но низкой скоростью аккумуляции макрочастиц угля – 0,3 частиц/см² в год.

По результатам комплексного палеоэкологического анализа болотных отложений в верховье р. Большой Инжул выявлены следующие изменения природной среды. На протяжении длительного времени, начиная с 9,8 тыс. кал.л.н., произрастал смешанный пихтово-еловый с кедром и сосной хвощово-зеленомошный лес. В термический максимум голоцена в пойме р. Большой Инжул происходило накопление оторфованного суглинка. Процесс торфонакопления датирован началом неогляциала – 5,4 тыс. кал.л.н., заболоченный лес был развит вплоть до 3,0 тыс. кал.л.н., позже, по мере нарастания торфяной толщи, произошло снижение водно-минерального пи-

тания, облесенность болота постепенно сократилась. Около 1,6 тыс. кал.л.н. доминирующее положение получили мезотрофные сфагновые сообщества. Последние примерно 200 лет в составе напочвенного покрова наблюдается усиление участия зеленого мха, что может быть связано с послепожарными сукцессиями. Относительно недавно на болоте начал развиваться ельник бруснично-клюквенно-сфагновый.

В настоящее время нами завершается анализ фоссильных спорово-пыльцевых спектров из отложений болота Большой Инжул. Полученные данные, в сравнении с описанной динамикой по макроостаткам и частицам угля, позволят дополнить и уточнить палеоэкологическую историю в западной части Восточного Саяна.

Список литературы / References

- Арбатская М. К. (1998) *Многолетняя изменчивость климата, прироста деревьев и частоты пожаров в тайге Средней Сибири. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Красноярск, 21 с. [Arbatskaya M. K. (1998) *Long-term variability of climate, tree growth and frequency of fires in the taiga of Central Siberia. Abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences*. Krasnoyarsk, 21 p. (in Russian)]
- Бардунов Л. В. (1969) *Определитель листостебельных мхов Центральной Сибири*. Ленинград, Наука, 329 с. [Bardunov L. V. (1969) *The handbook of the mosses of Central Siberia*. Leningrad, Nauka, 329 p. (in Russian)]
- Безрукова Е. В., Амосова А. А., Чубаров В. М., Финкельштейн А. Л., Кулагина Н. В. (2017) Изменение природной среды северо-востока Республики Бурятия в пост-оптимальный период голоцена: первые результаты. *Сибирский экологический журнал*, 24(4): 498–511 [Bezrukova E. V., Amosova A. A., Chubarov V. M., Finkelshtein A. L., Kulagina N. V. (2017) Environmental changes in the northeast of the Buryat Republic during the Holocene post-Optimum: First results. *Contemporary Problems of Ecology*, 10(4): 431–440]
- Безрукова Е. В., Тарасов П. Е., Кулагина Н. В., Абзаева А. А., Летунова П. П., Кострова С. С. (2011) Палинологическое исследование донных отложений озера Котокель: (район озера Байкал). *Геология и геофизика*, 52(4): 586–595 [Bezrukova E. V., Tarasov P. E., Kulagina N. V., Abzaeva A. A., Letunova P. P., Kostrova S. S. (2011) Palynological study of lake Kotokel' bottom sediments (Lake Baikal region). *Russian Geology and Geophysics*, 52(4): 458–465]
- Беляк И. Ф. (1949) *Рельеф заповедника «Столбы»*. Красноярск, 160 с. [Belyak I. F. (1949) *Relief of the Stolby Nature Reserve*. Krasnoyarsk, 160 p. (in Russian)]
- Бляхарчук Т. А., Дегтярева М. А., ван Харденбрук М. (2021) Голоценовая динамика лесных пожаров по данным макроуголькового анализа донных отложений болотного озера в окрестно-

стях научной станции «Мухрино», Ханты-Мансийский автономный округ. *Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Шестого Международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 28 июня – 08 июля 2021)*. Томск, Издательство Томского университета, с. 161–163 [Blyakharchuk T. A., Degtyareva M. A., van Hardenbroek M. (2021) Holocene dynamics of local fires according to macrocharcoal analysis of bottom sediments of a swamp lake in the vicinity of the scientific station Mukhrino, Khanty-Mansiysk district. *West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present. Proceedings of the Fifth International Field Symposium (Khanty-Mansiysk, June 28 – July 08 2021)*. Tomsk, Publishing House of Tomsk University, p. 161–163 (in Russian)]

Бляхарчук Т. А., Пупышева М. А. (2022) Динамика растительного покрова и пожаров Горной Шории (Северный Алтай) в позднем голоцене: по палеоэкологическим данным торфяника Малый Лабыш. *Сибирский экологический журнал*, 29(2): 133–146 [Blyakharchuk T. A., Pupyshcheva M. A. (2022) Dynamics of vegetation and fires in Gornaya Shoriya (Northern Altai Mountains) in the Late Holocene according to palynological and charcoal research into the Maly Labysh Mire. *Contemporary Problems of Ecology*, 15(2): 109–117]

Борисова О. К. (2014) Ландшафтно-климатические изменения в голоцене. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, 2: 5–20 [Borisova O. K. (2014) Landscape and climate change in Holocene. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2: 5–20 (in Russian)]

Васильев А. Н. (2003) Сфагны Саян. *Флора Саян: Учебное пособие*. Степанов Н. В., Васильев А. Н., Тупицына Н. Н. и др. Красноярск, КрасГУ, с. 7–11 [Vasiliev A. N. (2003) Sphagnum of Sayan Mountains. *Flora of Sayan Mountains: Study guide*. Stepanov N. V., Vasiliev A. N., Tupitsyna N. N. and others. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University, p. 7–11 (in Russian)]

Волкова В. С., Бахарева В. А., Левина Т. П. (1989) Растительность и климат голоцена Западной Сибири. *Палеоклиматы позднеледникового и голоцена*. Хотинский Н. А. (ред.) Москва, Наука, с. 90–95 [Volkova V. S., Bakhareva V. A., Levina T. P. (1989) Vegetation and climate of the Holocene of Western Siberia. *Paleoclimates of the late glacial period and Holocene*. Khotinsky N. A. (Ed.) Moscow, Nauka, p. 90–95 (in Russian)]

Геологическая карта СССР (1958) Масштаб 1:200 000. Серия Минусинская. Лист N-46-III. Предтеченский А. А. (ред.) Красноярск, Красноярское геологическое управление [Geological map of the USSR (1958) Scale 1:200,000. Minusinskaya series. Sheet N-46-III. Predtechensky A. A. (Ed.) Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Geological Administration (in Russian)]

Геоморфологическое районирование СССР и прилегающих морей (1980) Воскресенский С. С., Леонтьев О. К., Спиридонов А. И., Лукьянова С. А., Ульянова Н. С., Ананьев Г. С., Андреева Т. С., Варущенко С. И., Спасская И. И. Москва, Высшая школа, 343 с. [Geomorphological zoning of the USSR and adjacent seas (1980) Voskresensky S. S., Leontyev O. K., Spiridonov A. I., Lukyanova S. A., Ulyanova N. S., Ananyev G. S., Andreeva T. S., Varushchenko S. I., Spasskaya I. I. Moscow, Vysshaya shkola, 343 p. (in Russian)]

Гончарова Н. В., Кнорре А. А. (2018) Основные тенденции изменений климата в заповеднике «Столбы» по данным собственной метеостанции за непрерывный период наблюдений 1947–2016 гг. *Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. Выпуск 8*. Непомнящий В. В. (ред.) Новосибирск, СО РАН, с. 15–19 [Goncharova N. V., Knorre A. A. (2018)

The major tendencies of climate change in the “Stolby” Reserve according to the own meteorological station for the continuous observation period 1947–2016. *Scientific research in nature reserves and national parks of Southern Siberia. Issue 8*. Nepomnyashchii V. V. (Ed.) Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, p. 15–19 (in Russian)]

ГОСТ 11306–2013 (2019) *Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности*. Москва, Стандартинформ, 6 с. [State standard (GOST) 11306–2013 (2019) *Peat and products of its processing. Methods for determination of ash content*. Moscow, Standartinform, 6 p. (in Russian)]

Гренадерова А. В., Мандрыка П. В., Сяокунь В., Сенотрусова П. О., Михайлова А. Б., Цянькунь Ц. (2021) Комплексные археолого-палеоэкологические исследования голоценового хроноряда в южной тайге Среднего Енисея. *Stratum Plus*, 6: 299–313 [Grenaderova A. V., Mandryka P. V., Xiaokun W., Senotrusova P. O., Mikhailova A. B., Quiankun Q. (2021) Comprehensive archaeological and palaeoecological studies of the Holocene chronosequence in the southern taiga of the middle Yenisei. *Stratum Plus*, 6: 299–313 (in Russian)]

Гренадерова А. В., Михайлова А. Б., Скребатун А. А. (2023) Отражение климатических изменений в гидроморфных ландшафтах Южной Сибири. *Российско-монгольско-китайское приграничье: природно-ресурсная и этнокультурная основа устойчивого развития. Материалы научно-практической конференции с международным участием*. Новосибирск, Центр биосферных исследований, с. 190–193 [Grenaderova A. V., Mikhailova A. B., Screbatun A. A. (2023) Reflection of climatic changes in the hydromorphic landscapes of Southern Siberia. *Russian-Mongolian-Chinese borderland: natural-resource and ethnocultural basis of sustainable development. Materials of the scientific and practical conference (with the involvement of foreign scientists)*. Kyzyl, Center for Biosphere Research, p. 190–193 (in Russian)]

Гренадерова А. В., Михайлова А. Б., Курьина И. В., Подобуева О. В. (2024) Отклик растительного покрова в предгорье Восточного Саяна на голоценовые экстремумы климата (по данным изучения болота Большое). *Геоморфология и палеогеография*, 55(4): 157–176 [Grenaderova A. V., Mikhailova A. B., Kurina I. V., Podobueva O. V. (2024) The vegetation cover response in the Eastern Sayan Foothills to the Holocene climate extremes (the Bolshoye Peat Bog case study). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*, 5(4): 157–176 (in Russian)]

Демиденко Г. А., Котенева Е. В. (2012) *Эволюция палеоландшафтов Красноярской лесостепи в позднем плейстоцене и голоцене*. Красноярск, КрасГАУ, 144 с. [Demidenko G. A., Koteneva E. V. (2012) *Evolution of paleolandscapes of the Krasnoyarsk forest-steppe in the Late Pleistocene and Holocene*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University, 144 p. (in Russian)]

Демиденко Г. А., Хижняк С. В. (2018) Корреляционные связи между компонентами палеоландшафтов юга Приенисейской Сибири в голоцене. *Вестник КрасГАУ*, 3: 206–210 [Demidenko G. A., Khizhnyak S. V. (2018) Correlation relations between paleolandscapes components of the south of Priyeniseyskaya Siberia in the Holocene. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University* [Vestnik KrasGAU], 3: 206–210 (in Russian)]

Домбровская А. В., Коренева М. М., Тюремнов С. Н. (1959) *Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе*. Москва, Ленинград, Госэнергоиздат, 137 с. [Dombrovskaya A. V., Koreneva M. M., Turemnov S. N. (1959) *Atlas of plant residues found in peat*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 137 p. (in Russian)]

Ерунова М.Г., Кнорре А.А. (2022) Ретроспективный анализ лесных пожаров на территории национального парка «Красноярские Столбы». *Сибирский лесной журнал*, 5: 22–33 [Erunova M. G., Knorre A. A. (2022) The wild fires retrospective analysis in the national park «Krasnoyarsk Stolby». *Siberian Journal of Forest Science* [Sibirskii lesnoi zhurnal], 5: 22–33 (in Russian)]

Игнатов М.С., Игнатова Е.А. (2003) *Флора мхов средней части Европейской России. Т. 1.* Москва, КМК, 608 с. [Ignatov M. S., Ignatova E. A. (2003) *Flora of mosses in the middle part of European Russia. Vol. 1.* Moscow, KMK Scientific Press, 608 p. (in Russian)]

Карпенко Л.В., Гренадерова А.В., Михайлова А.Б., Подобуева О.В. (2022) Реконструкция локальных пожаров в голоцене по данным содержания макрочастиц угля в торфяной залежи в долине реки Дубчес. *Сибирский лесной журнал*, 4: 3–13 [Karpenko L. V., Grenaderova A. V., Mikhailova A. B., Podobueva O. V. (2022) Reconstruction of holocene local fires according to the macrocharcoals content from the peat deposits in the Dubches River valley. *Siberian Journal of Forest Science* [Sibirskii lesnoi zhurnal], 4: 3–13 (in Russian)]

Карпенко Л.В., Кнорре А.А. (2019) Ретроспективный анализ растительности болотных фитоценозов. *Летопись природы заповедника «Столбы». Книга 76, 2018 год.* Красноярск, с. 88–92 [Karpenko L. V., Knorre A. A. (2019) A retrospective analysis of vegetation of marsh plant communities. *Chronicle of the nature of the Stolby Nature Reserve. Book 76, 2018.* Krasnoyarsk, p. 88–92 (in Russian)]

Кац Н.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. (1977) *Атлас растительных остатков в торфах.* Москва, Недра, 376 с. [Katz N. Ya., Katz S. V., Skobeeva E. I. (1977) *Atlas of plant residues in peats.* Moscow, Nedra, 376 p. (in Russian)]

Качинский Н.А. (1958) *Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения.* Москва, АН СССР, 192 с. [Kachinsky N. A. (1958) *Mechanical and microaggregate composition of soil and methods of its study.* Moscow, USSR Academy of Sciences, 192 p. (in Russian)]

Кнорре А.А., Гончарова Н.В., Ерунова М.Г. (2021) Динамика снежного покрова в национальном парке «Красноярские Столбы» за период 1950–2020 годов. *Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. Выпуск 10.* Непомнящий В.В. (ред.) Новосибирск, СО РАН, с. 50–55 [Knorre A. A., Goncharova N. V., Erunova M. G. (2021) Snow cover dynamics in the National park Krasnoyarsk Stolby for the period 1950–2020. *Scientific research in nature reserves and national parks of Southern Siberia. Issue 10.* Nepomnyashchii V. V. (Ed.) Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, p. 50–55 (in Russian)]

Кнорре А.А., Целихин М.К., Щербаков В.М. (2023) Особенности формирования снежного покрова в горных условиях национального парка «Красноярские Столбы» за период 1946–2020. *Мониторинг состояния природных комплексов и многолетние исследования на особо охраняемых природных территориях.* Шушенское, Саяно-Шушенский биосферный заповедник, с. 8–11 [Knorre A. A., Tselikhin M. K., Shcherbakov V. M. (2023) Snow cover formation in mountainous conditions of the Krasnoyarsk Stolby National Park for the period 1946–2020. *Monitoring of the state of natural complexes and long-term research in specially protected natural areas.* Shushenskoye, Sayano-Shushensk Biosphere Reserve, p. 8–11 (in Russian)]

Коляго С.А. (1961) Почвы Красноярского государственного заповедника «Столбы». *Труды Государственного заповедника «Столбы».* Красноярск, Книжное издательство, с. 199–247

[Kolyago S. A. (1961) Soils of the Krasnoyarsk State Nature Reserve “Stolby”. *Proceedings of the State Nature Reserve “Stolby”*. Krasnoyarsk, Book Publishing House, p. 199–247 (in Russian)]

Кошкарлов А. Д., Кошкарлова В. Л., Назимова Д. И. (2021) Многовековые климатические тренды трансформации кедровников в разных лесорастительных зонах гор Западного Саяна. *Сибирский лесной журнал*, 2: 3–16 [Koshkarov A. D., Koshkarova V. L., Nazimova D. I. (2021) Centuries-old climatic trends of transformation of the Siberian stone pine forests in different forest vegetation zones of the Western Sayan Mountains. *Siberian Journal of Forest Science* [Sibirskii lesnoi zhurnal], 2: 3–16 (in Russian)]

Кошкарлова В. Л., Кошкарлов А. Д., Кольцова В. Г. (2006) Климатическая обусловленность динамики позднеголоценовых ценотипов древесных пород во внутреннем экотоне лесов Восточного Саяна. *Экология*, 5: 350–359 [Koshkarova V. L., Koshkarov A. D., Kol'tsova V. G. (2006) Climatic dependence of the Late Holocene dynamics of tree species cenotypes in the intrazonal ecotone of Eastern Sayan forests. *Russian Journal of Ecology*, 37(5): 316–324]

Крылов Г. В., Марадудин И. И., Михеев Н. И., Козакова Н. Ф. (1986) *Пихта*. Москва, Агропромиздат, 239 с. [Krylov G. V., Maradudin I. I., Mikheyev N. I., Kozakova N. F. (1986) *Fir*. Moscow, Agropromizdat, 240 p. (in Russian)]

Куликова Г. Г. (1974) *Краткое пособие к ботаническому анализу торфа*. Москва, Издательство Московского университета, 94 с. [Kulikova G. G. (1974) *A short guide to the botanical analysis of peat*. Moscow, Moscow University, 94 p. (in Russian)]

Куприянов Д. А., Новенко Е. Ю. (2019) Реконструкция динамики лесных пожаров Центральной Мещеры в голоцене (по данным палеоантракологического анализа). *Сибирский экологический журнал*, 26(3): 253–263 [Kupriyanov D. A., Novenko E. Y. (2019) Reconstruction of the Holocene dynamics of forest fires in the central part of Meshcherskaya Lowlands according to antracological analysis. *Contemporary Problems of Ecology*, 12(3): 204–212]

Куприянов Д. А., Новенко Е. Ю., Мазей Н. Г., Прокушкин С. А. (2021) Динамика лесных пожаров в центре и на северо-западе Среднесибирского плоскогорья в позднем голоцене: реконструкция по данным изучения макроскопических частиц угля в торфе. *Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Шестого Международного полевого симпозиума*. Томск, Издательство Томского университета, с. 167–169 [Kupriyanov D. A., Novenko E. Yu., Mazei N. G., Prokushkin S. A. (2021) Dynamics of forest fires in the central and north-west parts of the Central Siberian Plateau in the Late Holocene: reconstruction based on the analysis of macrocharcoal in peat. *West Siberian peatlands and carbon cycle: Past and present. Proceedings of the Sixth International Field Symposium*. Tomsk, Tomsk University, p. 167–169 (in Russian)]

Лесные экосистемы Енисейского меридиана (2002) Плешиков Ф. И., Ваганов Е. А., Ведрова Э. Ф. и др. Новосибирск, Издательство Сибирского отделения РАН, 356 с. [Forest ecosystems of the Yenisei meridian (2002) Pleshikov F. I., Vaganov E. A., Vedrova E. F. et al. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 356 p. (in Russian)]

Летопись природы национального парка «Красноярские Столбы» (2023) Красноярск, 321 с. [Chronicle of nature of the Krasnoyarskie Stolby National Park (2023) Krasnoyarsk, 321 p. (in Russian)]

Мазей Н. Г., Прокушкин С. А., Куприянов Д. А., Новенко Е. Ю. (2021) Влияние пожаров на динамику лесных экосистем Центральной Эвенкии в последние 3500 лет. *Вестник Московско-*

го университета. Серия 5. География, 5: 78–90 [Mazei N. G., Prokushkin A. S., Kypriyanov D. A., Novenko E. Yu. (2021) Impact of fires on the dynamics of forest ecosystems in central Evenkia during the last 3.5 ka. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography* [Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya], 5: 78–90 (in Russian)]

Макаров Н. П., Мандрыка П. В., Ямских А. Ф., Ямских Г. Ю. (1995) Археологический материал и палеогеография многослойной стоянки Шалунин бык. *Палеогеография Средней Сибири. Выпуск 2*. Красноярск, с. 113–135 [Makarov N. P., Mandryka P. V., Yamskikh A. F., Yamskikh G. Yu. (1995) Archaeological materials and paleogeography of the multilayered Shalunin Byk site. *Paleogeography of Central Siberia, Issue 2*. Krasnoyarsk, p. 113–135 (in Russian)]

Назимова Д. И., Первунин В. А., Тропина Е. Ф., Ерунова М. Г. (2010) Ландшафтно-лесотипологическая структура заповедника. *Труды государственного заповедника «Столбы». Выпуск 19*. Красноярск, с. 16–38 [Nazimova D. I., Pervunin V. A., Tropina E. F., Yerunova M. G. (2010) Landscape and forest typological structure of the reserve. *Proceedings of the State Nature Reserve “Stolby”. Issue 19*. Krasnoyarsk, p. 16–38 (in Russian)]

Новенко Е. Ю. (2021) Динамика ландшафтов и климата в Центральной и Восточной Европе в голоцене – прогнозные оценки изменения природной среды. *Геоморфология*, 52(3): 24–47 [Novenko E. Yu. (2021) Landscape and climate dynamics in Central and Eastern Europe during the Holocene – assessment of future environmental changes. *Geomorfologiya*, 52(3): 24–47 (in Russian)]

Подобуева О. В., Гренадерова А. В., Михайлова А. Б. (2023) Макроуголь в болотных отложениях предгорья Восточного Саяна и равнинной тайги Красноярского края как индикатор пожарного режима среднего и позднего голоцена. *Экология: факты, гипотезы, модели. Материалы Всероссийской конференции молодых ученых*. Екатеринбург, Институт экологии растений и животных УрО РАН, с. 185–190 [Podobueva O. V., Grenaderova A. V., Mikhailova A. B. (2023) Macrocharcoal in marsh sediments of the foothills of the Eastern Sayan and lowland taiga of the Krasnoyarsk Territory as an indicator of the fire regime of the Middle and late Holocene. *Ecology: facts, hypotheses, models. Proceedings of the All-Russian Conference of Young Scientists*. Yekaterinburg, Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, p. 185–190 (in Russian)]

Покровский Б. Г., Панин А. В. (2025) Изменения климата, отраженные в изотопном составе углерода и кислорода голоценовых карбонатов озера Тере-Холь, Тыва (Южная Сибирь). *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 33(3): 118–142 [Pokrovskiy B. G., Panin A. V. (2025) Climate changes reflected in the carbon and oxygen isotope composition of Holocene carbonates of Lake Tere-Khol, Tyva (Southern Siberia). *Stratigraphy and Geological Correlation*, 33(3): 396–417]

Поликарпов Н. П. (1970) Комплексные исследования в горных лесах Западного Саяна. *Вопросы лесоведения*. Красноярск, ИЛИД СО АН СССР, с. 26–79 [Polikarpov N. P. (1970) Integrated studies in the mountain forests of the Western Sayan. *Forestry issues*. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, p. 26–79 (in Russian)]

Пронович Н. А., Гренадерова А. В. (2021) Применение анализа «Charcoal» для реконструкции пожаров голоцена в долине р. Мина. *География и геоэкология на службе науки и инновационного образования. Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Красноярск, Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева, с. 65–69 [Pronovich N. A., Grenaderova A. V. (2021) Applying the

charcoal analysis for the reconstruction of Holocene fires in the valley of the Mina river. *Geography and Geoecology in the Service of Science and Innovative Education. Proceedings of the XVI All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation*. Krasnoyarsk, V.P. Astafiev Krasnoyarsk State Pedagogical University, p. 65–69 (in Russian)]

Пупышева М. А., Бляхарчук Т. А. (2023) Пожары и их значение в послеледниковый период Земли: обзор методов, достижений, наработок. *Сибирский экологический журнал*, 30(3): 276–291 [Pupysheva M. A., Blyakharchuk T. A. (2023) Fires and their significance in the Earth's post-glacial period: A review of methods, achievements, groundwork. *Contemporary Problems of Ecology*, 16(3): 303–315]

Пупышева М. А., Бляхарчук Т. А. (2024) Реконструкция голоценовой истории палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири по данным макроуголькового анализа озерных отложений. *Геосферные исследования*, 1: 135–151 [Pupysheva M. A., Blyakharchuk T. A. (2024) Reconstruction of the holocene paleo-fire history in the middle taiga subzone of Western Siberia according to the macro-charcoal analysis of lake sediments. *Geosphere Research* [Geosfernye issledovaniya], 1: 135–151 (in Russian)]

Разжигаетева Н. Г., Ганзей Л. А., Мохова Л. М., Макарова Т. Р., Паничев А. М., Кудрявцева Е. П., Арсланов Х. А. (2018) Урочище Мута как архив изменений природной среды (Национальный парк «Зов Тигра», Россия). *Биота и среда заповедных территорий*, 1: 37–70 [Razjigaeva N. G., Ganzey L. A., Mokhova L. M., Makarova T. R., Panichev A. M., Kudryavtseva E. P., Arslanov Kh. A. (2018) Muta area as a natural archive of the environmental changes (National Park «Zov Tigra», Russia). *Biota and Environment of Protected Areas* [Biota i sreda zapovednykh territorii], 1: 37–70 (in Russian)]

Ревин В. В. (1977) *Четвертичные пески и песчано-гравийные отложения*. Москва, Недра, 184 с. [Revin V. V. (1977) *Quaternary sands and sand-gravel deposits*. Moscow, Nedra, 184 p. (in Russian)]

Рогозин Д. Ю., Болобанщикова Г. Н., Бурдин Л. А., Мейдус А. В. (2022) Угольные макрочастицы в донных отложениях озер центрально-тунгусского плато (Сибирь, Эвенкия) как индикатор динамики лесных пожаров и возможный след Тунгусской катастрофы 1908 г. *Сибирский экологический журнал*, 29(4): 404–414 [Rogozin D. Y., Bolobanshchikova G. N., Burdin L. A., Meydus A. V. (2022) Macroparticle charcoal in lake sediments of the Central Tunguska Plateau (Siberia, Evenkia) as an indicator of forest fires and a possible trace of the Tunguska Event of 1908. *Contemporary Problems of Ecology*, 15(4): 337–344]

Рогозин Д. Ю., Бурдин Л. А., Болобанщикова Г. Н. (2023а) Угольные макрочастицы в верхних слоях донных отложений озёр Северо-Минусинской котловины (юг Сибири) как индикатор динамики пожаров на окружающей территории. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*, 16(2): 252–266 [Rogozin D. Y., Burdin L. A., Bolobanshchikova G. N. (2023a) Macrocharcoal in upper sediments of the lakes of North-Minusinsk Valley (southern Siberia) as a proxy of fires on the surrounding territory. *Journal of Siberian Federal University. Biology* [Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Biologiya], 16(2): 252–266 (in Russian)]

Рогозин Д. Ю., Бурдин Л. А., Мейдус А. В. (2023b) Угольные макрочастицы в донных отложениях озера Суздалево (Красноярский край, Эвенкия) как индикатор природных пожаров: к проблеме Тунгусской катастрофы 1908 г. *Журнал Сибирского федерального университета*.

Биология, 16(3): 271–281 [Rogozin D. Y., Burdin L. A., Meydus A. V. (2023b) Macro-charcoal in sediments of Lake Suzdalevo (Krasnoyarsk Krai, Siberia) as a proxy of natural fires: on the problem of the Tunguska 1908 Event. *Journal of Siberian Federal University. Biology* [Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya], 16(3): 271–281 (in Russian)]

Савич-Любицкая Л. И., Смирнова З. Н. (1968) *Определитель сфагновых мхов СССР*. Ленинград, Наука, 109 с. [Savicz-Ljubitzkaja L. I., Smirnova Z. N. (1968) *The handbook of Sphagnaceae of the U.S.S.R.* Leningrad, Nauka, 109 p. (in Russian)]

Сукачев В. Н., Зонн С. В. (1961) *Методические указания к изучению типов леса*. Москва, Издательство Академии наук СССР, 143 с. [Sukachev V. N., Zonn S. V. (1961) *Methodical instructions for studying forest types*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 143 p. (in Russian)]

Торфяные месторождения и их разведка (руководство по лабораторно-практическим занятиям) (1977) Ларгин И. Ф. (ред.) Москва, Недра, 264 с. [*Peat deposits and their exploration (guidelines for laboratory and practical classes)* (1977) Largin I. F. (Ed.) Moscow, Nedra, 264 p. (in Russian)]

Физическая география Красноярского края: учебное пособие для студентов высших учебных заведений (2016) Ананьева Т. А., Чеха В. П., Елин О. Ю. и др. Красноярск, Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева, 296 с. [*Physical geography of Krasnoyarsk Krai: a textbook for students of higher educational institutions* (2016) Ananyeva T. A., Chekha V. P., Elin O. Yu., et al. Krasnoyarsk, V. P. Astafiev Krasnoyarsk State Pedagogical University, 296 p. (in Russian)]

Флора мхов России. Том 5 (2020) Игнатов М. С. (ред.) Москва, Товарищество научных изданий КМК, 600 с. [*Flora of the mosses of Russia. Volume 5* (2020) Ignatov M. S. (Ed.) Moscow, KMK Scientific Press, 600 p. (in Russian)]

Флора мхов России. Том 6 (2022) Игнатов М. С. (ред.) Москва, Товарищество научных изданий КМК, 472 с. [*Flora of the mosses of Russia. Volume 6* (2022) Ignatov M. S. (Ed.) Moscow, KMK Scientific Press, 472 p. (in Russian)]

Фокина Н. В., Лигаева Н. А., Андреева Е. Б., Должковая Н. П. (2006) Исследование климатических особенностей заповедника «Столбы». *Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева*, 2: 22–27 [Fokina N. V., Ligaeva N. A., Andreeva E. B., Dolzhkovaya N. P. (2006) A study of climatic features of the “Stolby” Nature Reserve. *Bulletin of Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafyev* [Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V. P. Astaf'eva], 2: 22–27 (in Russian)]

Харук В. И., Шушпанов А. С., Петров И. А., Демидко Д. А., Им С. Т., Кнорре А. А. (2019) Усыхание *Abies sibirica* Ledeb. в горных лесах Восточного Саяна. *Сибирский экологический журнал*, 26(4): 369–382 [Kharuk V. I., Shushpanov A. S., Petrov I. A., Demidko D. A., Im S. T., Knorre A. A. (2019) Fir (*Abies sibirica* Ledeb.) mortality in mountain forests of the Eastern Sayan Ridge, Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 12(4): 299–309 (in Russian)]

Хотинский Н. А. (1977) *Голоцен Северной Евразии: опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата*. Москва, Наука, 197 с. [Khotinsky N. A. (1977) *The Holocene of Northern Eurasia: experience of transcontinental correlation of stages of vegetation and climate development*. Moscow, Nauka, 197 p. (in Russian)]

Шарова О. Г., Безрукова Е. В., Летунова П. П., Кулагина Н. В., Щетников А. А., Филинов И. А., Иванов Е. В., Левина О. В. (2015) Растительность и климат Танхойской подгорной равнины (южное побережье оз. Байкал) в позднеледниково́е и голоцене. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Геоархеология. Этнология. Антропология*, 11: 86–102 [Sharova O. G., Bezrukova E. V., Letunova P. P., Kulagina N. V., Shchetnikov A. A., Filinov I. A., Ivanov E. V., Levina O. V. (2015) Vegetation and climate of the Tankhoi foothill plain (Lake Baikal southern shore) over the Late Glacial and Holocene. *Bulletin of the Irkutsk State University. Geoarchaeology, Ethnology, and Anthropology Series* [Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geoarkheologiya. Etnologiya. Antropologiya], 11: 86–102 (in Russian)]

Barhoumi C., Vogel M., Dugerdil L., Limani H., Joannin S., Peyron O., Ali A. A. (2021) Holocene fire regime changes in the southern Lake Baikal region influenced by climate-vegetation-anthropogenic activity interactions. *Forests*, 12(8): 978

Barhoumi C., Peyron O., Joannin S., Subetto D., Kryshen A., Drobyshev I., Girardin M. P., Brossier B., Paradis L., Pastor T., Alleaume S., Ali A. A. (2019) Gradually increasing forest fire activity during the Holocene in the northern Ural region (Komi Republic, Russia). *Holocene*, 29(12): 1906–1920

Blyakharchuk T. A., Chernova N. A. (2013) Vegetation and climate in the Western Sayan Mts according to pollen data from Lugovoe Mire as a background for prehistoric cultural change in southern Middle Siberia. *Quaternary Science Reviews*, 75: 22–42

Clark J. S. (1988) Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary Research*, 30(1): 67–80

Clark J. S., Lynch J., 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

Columbu A., Zhornyak L. V., Zanchetta G., Drysdale R. N., Hellstrom J. C., Isola I., Regattieri E., Fallick A. E. (2023) A mid Holocene stalagmite multiproxy record from southern Siberia (Krasnoyarsk, Russia) linked to the Siberian High patterns. *Quaternary Science Reviews*, 320: 108355

Finsinger W., Bonnici I. (2022) tapas: an R package to perform trend and peaks analysis. (v0.1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6344463>

Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. (2009) Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 15(3): 549–560

Grenaderova A. V., Mikhailova A. B., Sharafutdinov R. A., Stoyko T. G. (2024) Holocene environmental conditions in the Eastern Sayan foothills according to a comprehensive paleoecological study of the Sosnovka mire. *Limnology and Freshwater Biology*, 4: 394–399

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 (in Russian)

Higuera P. (2009) *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis*. Bozeman, MT, Montana State University, 27 p.

Ingólfsson Ó., Hjort C., Berkman P. A., Björck S., Colhoun E., Goodwin I. D., Hall B., Hirakawa K., Melles M., Möller P., Prentice M. L. (1998) Antarctic glacial history since the Last Glacial Maximum: an overview of the record on land. *Antarctic Science*, 10(3): 326–344

Katamura F., Fukuda M., Bosikov N. P., Desyatkin R. V. (2009) Forest fires and vegetation during the Holocene in central Yakutia, eastern Siberia. *Journal of Forest Research*, 14(1): 30–36

Krивonogov S. K., Takahara H., Yamamuro M., Preis Y. I., Khazina I. V., Khazin L. B., Kuzmin Y. V., Safonova I. Y., Ignatova N. V. (2012) Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Beloye. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 331–332: 177–193

MacDonald G. M., Velichko A. A., Kremenetski C. V., Borisova O. K., Goleva A. A., Andreev A. A., Cwynar L. C., Riding R. T., Forman S. L., Edwards T. W. D., Aravena R., Hammarlund D., Szeicz J. M., Gattaulin V. N. (2000) Holocene treeline history and climate change across Northern Eurasia. *Quaternary Research*, 53(3): 302–311

Mayewski P. A., Rohling E. E., Stager J. C., Karlén W., Maasch K. A., Meeker L. D., Meyerson E. A., Gasse F., van Kreveland S., Holmgren K., Lee-Thorp J., Rosqvist G., Rack F., Staubwasser M., Schneider R. R., Steig E. J. (2004) Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62(3): 243–255

Mazei Y. A., Tsyganov A. N., Bobrovsky M. V., Mazei N. G., Kupriyanov D. A., Gałka M., Rostanets D. V., Khazanova K. P., Stoiko T. G., Pastukhova Y. A., Fatynina Y. A., Komarov A. A., Babeshko K. V., Makarova A. D., Saldaev D. A., Zazovskaya E. P., Dobrovolskaya M. V., Tiunov A. V. (2020) Peatland development, vegetation history, climate change and human activity in the Valdai Uplands (Central European Russia) during the Holocene: A multi-proxy palaeoecological study. *Diversity*, 12(12): 462

Mikhailova A. B., Grenaderova A. V., Chentaeva Z. V., Skrebatun A. A. (2024) Peat deposits for studying the Holocene fire regime in the example of Kansk forest-steppe mires. *Limnology and Freshwater Biology*, 4: 452–457

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(4): 948–966

Novenko E. Y., Kupriyanov D. A., Mazei N. G., Prokushkin A. S., Phelps L. N., Buri A., Davis B. A. S. (2022) Evidence that modern fires may be unprecedented during the last 3400 years in permafrost zone of Central Siberia, Russia. *Environmental Research Letters*, 17(2): 025004

Novenko E. Y., Tsyganov A. N., Volkova E. M., Kupriyanov D. A., Mironenko I. V., Babeshko K. V., Utkina A. S., Popov V., Mazei Y. A. (2016) Mid- and Late Holocene vegetation dynamics and fire history in the boreal forest of European Russia: A case study from Meshchera Lowlands. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 459: 570–584

Pupysheva M. A., Blyakharchuk T. A. (2024) The influence of palaeo-fire activity on the dynamics of vegetation cover in the piedmont of Northern Altai for the past 16000 years. *Limnology and Freshwater Biology*, 4: 588–593

Reimer P. J., Austin W. E. N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P. G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R. L., Friedrich M., Grootes P. M., Guilderson T. P., Hajdas I., Heaton T. J., Hogg A. G., Hughen K. A., Kromer B., Manning S. W., Muscheler R., Palmer J. G., Pearson C., van der Plicht J., Reimer R. W., Richards D. A., Scott E. M., Southon J. R., Turney C. S. M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S. M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. (2020) The IntCal20 northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4): 725–757

Rudaya N., Krivonogov S., Słowinski M., Cao X., Zhilich S. (2020) Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quaternary Science Reviews*, 249: 106616

Shatunov A.E., Kupriyanov D.A., Mazei N.G., Prokushkin A.S., Novenko E. Yu. (2024) The mid- and Late Holocene history of forest fires in Central Evenkia inferred from macrocharcoal analysis. *Limnology and Freshwater Biology*, 4: 636–641

Tarasov P., Bezrukova E., Karabanov E., Nakagawa T., Wagner M., Kulagina N., Letunova P., Abzaeva A., Granoszewski W., Riedel F. (2007) Vegetation and climate dynamics during the Holocene and Eemian interglacials derived from Lake Baikal pollen records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(3–4): 440–457

Van Geel B. (1978) A palaeoecological study of holocene peat bog sections in Germany and The Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 25(1): 1–120

Van Geel B., Heusser C.J., Renssen H., Shuurmans C.J. E. (2000) Climatic change in Chile at around 2700 BP and global evidence for solar forcing: a hypothesis. *Holocene*, 10(5): 659–664

Zhilich S., Rudaya N., Krivonogov S., Nazarova L., Pozdnyakov D. (2017) Environmental dynamics of the Baraba forest steppe (Siberia) over the last 8000 years and their impact on the types of economic life of the population. *Quaternary Science Reviews*, 163: 152–161