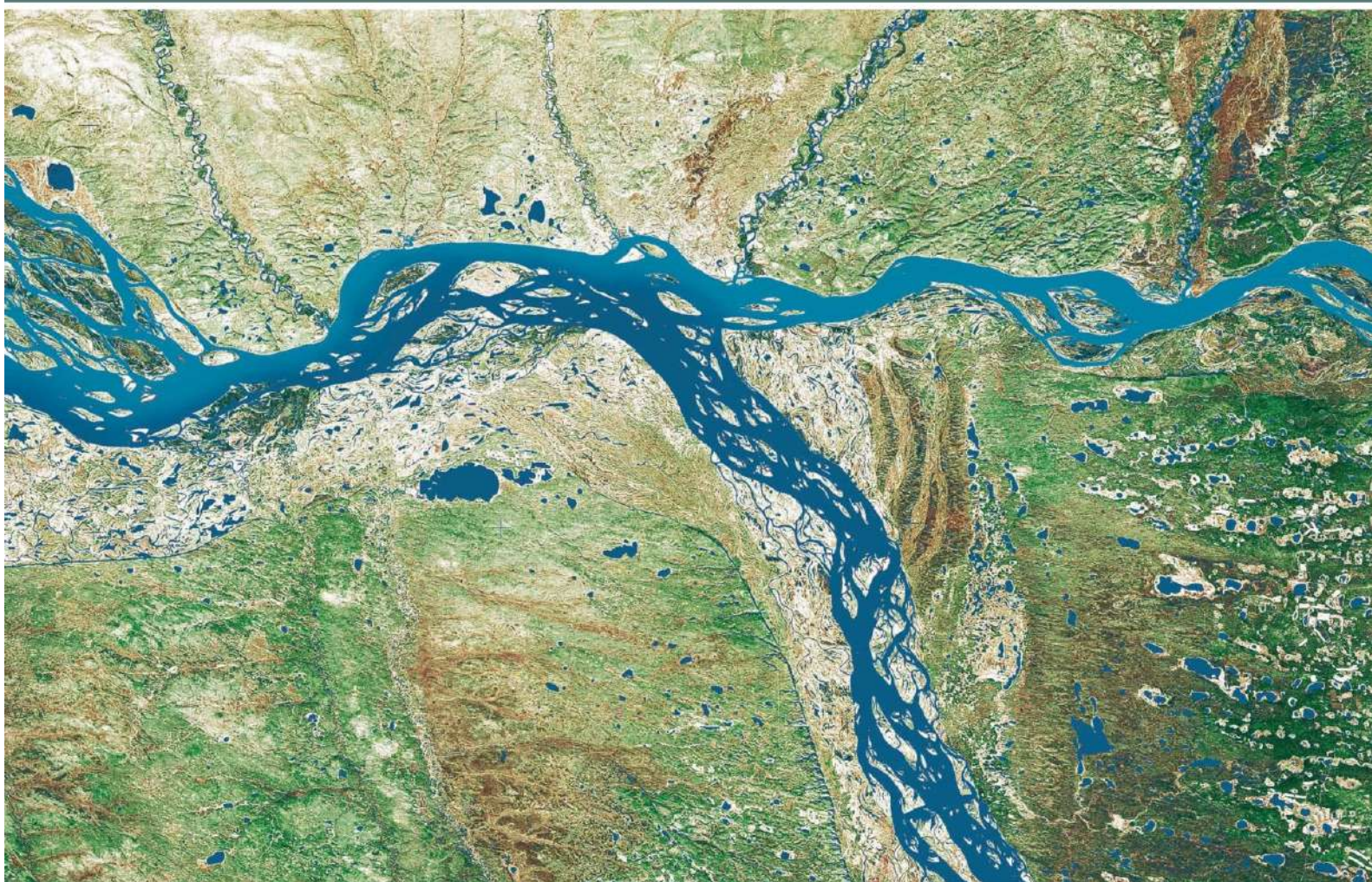


ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

**Environmental Dynamics and
Global Climate Change**



Том
Volume

15

Выпуск
Issue

2

2024



ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Volume 15
Issue 2

2024

<https://edgcccjournal.org>

EDITORIAL BOARD

EDITORS-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Office

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

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

S.M. Turchinskaya, technical editor (Moscow, Russia)

Founder:

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

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

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

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

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Том 15
Выпуск 2
2024

Журнал издается с 2008 года

<https://edgccjournal.org>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЕ РЕДАКТОРЫ

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

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

Редакция

О.А. Фролов, заведующий редакцией (Москва, Россия)
Д.Д. Очирова, редактор (Москва, Россия)
С.М. Турчинская, редактор (Москва, Россия)

Учредители:

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

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

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

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

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

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

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

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

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

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ / EXPERIMENTAL WORKS

Blyakharchuk T.A., Shefer N.V., Lukanina E., van Hardenbroek M., Juggins S., Zhang D.

Modern spore-pollen spectra of the Altai-Sayan region, their relationship with climate and transfer functions for palaeoclimate reconstructions 82–97

Shishkonakova E.A.

Features of distribution of a number of rare and protected plant species in the territories of oligotrophic and mesotrophic mires within oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra 98-104

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ / NOTES

Tyurin V.N., Kharbaka V.A., Maslovskaya O.V.

Multy-year dynamics of some physico-chemical parameters in mire water at the site of salt pollution of the raised bog (Vostochno-Surgutskoye oil field, Western Siberia) 105-111

ХРОНИКА / CHRONICLE

: Kupriianova Iu.V., Niyazova A.V., Verevkina E.L., Veretennikova E.E., Shanyeva V.S., Ilyasov D.V., Akhmedova I.D., Zmanovskaya A.S., Lapshina E.D.

The VII International Field Symposium was held in Yugra “West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present” 112-126

MODERN SPORE-POLLEN SPECTRA OF THE ALTAI-SAYAN REGION, THEIR RELATIONSHIP WITH CLIMATE AND TRANSFER FUNCTIONS FOR PALEOCLIMATE RECONSTRUCTIONS

Blyakharchuk T.A.^{1,2*}, Shefer N.V.², Lukanina E.A.³, van Hardenbroek M.⁴, Juggins S.⁴, Zhang D.^{5,6}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет, Томск, Россия

³Georg-August-Universität Göttingen, Germany

⁴Newcastle University, Newcastle, UK

⁵The Regional Environmental Centre for Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, China

⁶Institute of Desert Meteorology, Ürümqi, China

* blyakharchuk@mail.ru

Citation: Blyakharchuk T.A., Shefer N.V., Lukanina E., van Hardenbroek M., Juggins S., Zhang D. 2024. Modern spore-pollen spectra of the Altai-Sayan region, their relationship with climate and transfer functions for palaeoclimate reconstructions. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(2): 82–97.

DOI: 10.18822/edgcc635871

В работе проведён многомерный статистический анализ серии из 145 современных спорово-пыльцевых спектров (с.п.с.) с территории Алтае-Саянской горной области и прилегающих районов равнин с целью создания трансферных (переходных функций) для количественных реконструкций палеоклимата в Алтае-Саянском регионе. Проведённый кластерный анализ, а также PCA и RDA-анализы показали, что состав изученных спорово-пыльцевых спектров адекватно отражает не только особенности высотных поясов растительного покрова и состав материнских фитоценозов, но и температурно-влажностные градиенты, существующие на этой территории. Следовательно, несмотря на сложную комплексную структуру растительного покрова горного региона, представленная серия с.п.с. может быть использована в качестве обучающей выборки в построении трансферных (переходных) функций для использования их в палеорекострукциях на основе палеопалинологических данных. Статистический анализ показал, что по представленной выборке современных с.п.с. значимые модели можно построить для факторов TJUL, MAT, TJAN и MAP. Из 4 типов моделей, созданных нами на основе WA, WAPLS, MAT* и MLRC методов для 5 переменных MAT, MAP, TJAN, TJUL и GCI по представленной выборке с.п.с., наилучшие результаты моделей получены методом MAT* для факторов MAT, MAP, TJAN и GCI. Однако наиболее сильной оказалась модель переходной функции для TJUL, созданная методом MLRC ($R^2=0.7268$ и $RMSE=1.68^\circ\text{C}$). По характеристикам она сопоставима с моделями, ранее опубликованными другими авторами и созданными для реконструкции среднеиюльской температуры арктической зоны Сибири и для реконструкции таких характеристик растительного покрова, как облесённость в Европе и Северной Азии, NDVI и фракционированность на Тянь-Шане.

Дальнейший статистический анализ данных и сопоставление результатов с опубликованными по соседнему региону Центрального Тянь-Шаня показал, что в Алтае-Саянских горах Южной Сибири ведущим климатическим фактором, контролирующим вариабельность спорово-пыльцевых спектров, выступает температура вегетационного периода, выражением которой является TJUL, в то время как в горах Центрального Тянь-Шаня таким фактором является годовое количество атмосферных осадков MAP. Это хорошо отражает природные географические закономерности зависимости растительности от климата в более северном и холодном Алтае и в более южном с жарким континентальным климатом – Тянь-Шане. Учитывая разные ведущие факторы, контролирующие вариабельность с.п.с. в двух рассматриваемых регионах, вновь созданные трансферные функции можно рекомендовать для палеоклиматических реконструкций в Алтае-Саянском регионе.

Ключевые слова: спорово-пыльцевой спектр, растительный покров, Алтае-Саянская горная область, климат, палеорекострукции, переходные функции.

Quantitative reconstruction of paleoclimate based on spore-pollen data remains an important task in the study of long-term climate dynamics. The construction of transfer pollen-climate functions on a training set of modern spore-pollen spectra is an effective method for such studies, especially necessary in areas that are poorly supported by numerical reconstructions of paleoclimate, which includes Siberia. To solve this problem, a series of 145 modern spore-pollen spectra were collected during summer expedition at different years from various phytocenoses (plant functional types) representing biomes of: mountain forest, lowland forest, forest-steppe, steppe, desert steppe and alpine tundra-steppe on the territory of

the Altai-Sayan mountain region and adjacent areas of the plains (Fig. 1). At each sampling point, from 1 to 6 samples were taken in the form of moss pollsters or surface detritus, geographic coordinates were noted, and a geobotanical description of the vegetation was made. After physicochemical sample preparation, spore-pollen analysis was carried out using generally accepted methods. In common 143 pollen types were identified in study set of modern spore-pollen spectra. To create the transfer pollen-climate function, first of all, we studied by using the method of multivariate statistical analysis the relationship between the composition of the obtained spore-pollen spectra and the composition of maternal phytocenoses (based on geobotanical descriptions made during the collecting of samples), as well as with climatic parameters that could influence the composition of spores-pollen spectra. The results of constrained cluster analysis (Fig. 2) showed that each group of spore-pollen spectra characteristic of a particular biome is distinguished by a separate subcluster of the cluster tree, which confirms the possibility of identifying biomes by spore-pollen spectra. In addition, specific phytocenoses characterizing plant functional types are also distinguished by independent subclusters.

To study the general structure of the calibration set of modern spore-pollen spectra, a PCA analysis of sampling points (grouped by biomes) and pollen taxa was carried out using the “stats” package basic for “r”, as well as the “vegan” packages 2.6-4 [Oksanen et al., 2018] and “ellipse” 0.5.0 [Murdoch et al., 2018]. Based on the distribution of species and their ecology, axis 1 of the PCA biplot (Fig. 3) reflects the moisture gradient, and axis 2 is associated with the temperature gradient. The pollen types were distributed according to these gradients. The fields of the corresponding biomes are highlighted, by different marks united by colored ovals, which are shown in Fig. 3. Thus, in the most humid and warm conditions, in the upper right quarter of the PCA graph there are located pollen types character for biomes of lowland forests and mountain dark coniferous and “chern” forests with abundance of fir (*Abies sibirica*), birch (*Betula pendula*) and linden (*Tilia*) with tall grass and fern grass cover. In cold and dry conditions (lower left quarter of the PCA plot) pollen types of the alpine tundra-steppe (yellow oval) and desert steppe (pink oval) biomes are located.

To identify the influence of climatic factors on the variability of spore-pollen spectra, RDA analysis was performed on six factors: MAP - mean annual precipitation; TJAN - mean temperature of January; TJUL - mean temperature of July; MAT - mean annual temperature; Altitude and GCI - index continentality of Garchinski. Inflation Factors test showed that Altitude and GCI correlate positive with each other and strongly negative with MAT, hence they are not recommended for transfer function construction. The RDA plot (Fig. 4) revealed a positive correlation between MAP and TJAN, as well as *Abies sibirica* pollen and spores of ferns (*Monolete*), which reflects the spreading of dark coniferous tall-herb-fern mountain taiga and “chern” forests with fir, aspen, and linden on the western macroslope of the Kuznetski Alatau Mountains in an area with maximum precipitation and milder winters with abundant snow cover. A positive correlation was found between the Altitude factor and pollen of *Pinus sibirica*, *Betula nana* and *Cyperaceae*, reflecting the ecological conditions of the upper part of the mountain forest belt and the subalpine belt of sparse cedar forests with thickets of *Betula nana*, sedges and areas of alpine meadows. The pollen of xerophytic plants, from taxa *Artemisia* and *Chenopodiaceae* is strongly correlates with GCI. Pollen of *Poaceae* is equally correlates with GCI and Altitude factors, reflecting the distribution of grasses in both high-mountain tundra and steppe. Tree pollen of *Pinus sylvestris* and *Betula pendula* has maximum positive correlation with MAT, while with TJAN+MAP and TJUL these species correlate less strong.

The cluster analysis, as well as PCA and RDA analyses showed that the composition of the studied spore-pollen spectra adequately reflects not only the peculiarities of the altitudinal belts (biomes) of the vegetation cover and the composition of the parent phytocenoses (plant functional types), but also the temperature-humidity gradients existing in this area. Consequently, despite the complex structure of the vegetation cover of the mountain region, the presented series of spore-pollen spectra can be used as a training set in the construction of transfer functions for their use in paleoreconstructions based on paleopalynological data.

Transfer function modeling was performed with the R package “rioja” 1.0-6 using the numerical methods WA, WAPLS, MAT*, MLRC - evaluated by Bootstrap Cross-Validation to identify the strongest model for paleo reconstructions [Hall & Wilson, 1991; Payne et al., 2012]. Statistical analysis showed that for the presented set of modern spore-pollen spectra a significant models can be built for the factors TJUL, MAT, TJAN and MAP. Of the 4 types of models (based on WA, WAPLS, MAT* and MLRC methods) which we created for the 5 variables MAT, MAP, TJAN, TJUL and GCI for the presented set of modern spore-pollen spectra, the best model results were obtained by the MAT* method for the factors MAT, MAP, TJAN and GCI (Table 1). However, the transfer function model for TJUL created by the MLRC method ($R^2=0.7268$ and $RMSE=1.68^\circ\text{C}$) was the strongest. By performance characteristics our TJUL model is comparable to previously published models by other authors created for reconstruction the mean July temperature of the Arctic zone of Siberia [Klemm et al., 2013], and for reconstruction the vegetation cover characteristics such as afforestation [Tarasov et al., 2007; Zanon et al., 2018], NDVI [Liu et al., 2013; Chen et al., 2019], and fractional vegetation cover [Li et al., 2024].

Further statistical analysis of the data and comparison of the results with those published for the neighboring region of the central Tianshan Mountains [Li et al., 2024] showed that the leading climatic factor controlling the variability of spore-pollen spectra in the Altai-Sayan mountains of southern Siberia is the temperature of the growing season expressed as TJUL, while in the mountains of the central Tianshan such a factor is the annual precipitation - MAP. This reflects well the natural geographical patterns of vegetation-climate dependence in the more northern, humid and cold Altai and in the more southern hot and continental climate of Tianshan. Taking into account the different leading factors controlling the

variability of modern spore-pollen spectra and vegetation in the two regions under consideration, the newly created transfer functions can be recommended for paleoclimatic reconstructions in the Altai-Sayan region.

Key words: Spore-pollen spectrum, vegetation cover, Altai-Sayan mountain region, climate, paleo-reconstructions, transfer functions.

Используемые сокращения

WA – метод Взвешенной средней (Weighted Averaging);
WA-PLS – метод Взвешенной средней частичных наименьших квадратов (Weighted Averaging Partial Least Squares);
MAT* – техника Современных аналогов (Modern Analogue Technique);
MLRC – расчет Поверхности отклика максимальной вероятности (Maximum Likelihood response Surfaces);
MAT – среднегодовая температура;
MAP – среднегодовое количество осадков
TJAN – температура самого холодного месяца (января);
TJUL – температура самого теплого месяца (июля);
GCI – индекс континентальности Горчинского;
DCA – бестрендовый анализ соответствия (Detrended Correspondence Analysis);
PCA – метод главных компонент (Principal Component Analysis);
RDA – анализ избыточности (Redundancy Analysis);
 R^2 – коэффициент детерминации между наблюдаемым значением и реконструированным значением;
RMSE – среднее значение квадратической ошибки прогнозирования (Root Mean Square Error of prediction);
с.п.с. – спорово-пыльцевой спектр.

ВВЕДЕНИЕ

Современное изменение климата приводит к трансформации растительного и животного мира (IPCC, 2018). Не меньшую опасность представляет увеличение количества пожаров в результате современного изменения климата [Brushlinsky et al., 2008; Abatzoglou et al., 2019; Kukavskaya et al., 2013, 2016; Kharuk et al., 2015, 2018; Harrison et al., 2021]. Глобальное потепление также несёт риски сокращения поглощающей функции болот и изменения роли болотных экосистем с поглотителей парниковых газов на источники их эмиссии [Gallego-Sala et al., 2018]. Насколько наблюдаемые в наши дни явления обусловлены природной динамикой климата, а насколько антропогенным влиянием, возможно оценить только рассматривая долговременные изменения растительности и климата.

Современная глобальная сеть метеорологических наблюдений сложилась в XIX веке, то есть данные инструментальных наблюдений изменений климата охватывают лишь небольшой период истории нашей планеты. Объективные реконструкции долговременных количественных изменений климата прошлого возможны при использовании палеоэкологических методов исследования отложений прошлых эпох (озёрных, болотных, лёссовых), позволяющих реконструировать историю биологических сообществ, напрямую связанных с климатом. Предполагая, что взаимосвязи таксонов с экологическими условиями, благоприятными для их существования, остаются неизменными во времени, по крайней мере в течение четвертичного периода, можно реконструировать изменения прошлого климата на основе данных об ископаемых пыльцевых спектрах, отражающих материнские фитоценозы в период их формирования и захоронения. Используя данные о современном климате и современных сообществах организмов, существующих в конкретном климате, в качестве обучающего набора данных можно выявить статистические взаимосвязи между обилием таксонов в сообществах и количественными климатическими переменными [Seppä et al., 2004; Jiang et al., 2010; Lu et al., 2011; Klemm et al., 2013; Wei & Zhao, 2016]. Однако для успешной реконструкции палеоклимата необходим представительный набор данных современных спорово-пыльцевых спектров (с.п.с.), охватывающий все типы растительных сообществ, характерных для изучаемого региона и соседних территорий. Таким образом, изучение современных спорово-пыльцевых спектров различных ландшафтов региона необходимо для количественных реконструкций растительности и климата прошлого по ископаемым спорово-пыльцевым спектрам.

Для выявления взаимосвязей между составом пыльцевых спектров и показателями климата в количественном формате в зарубежных публикациях [Tarasov et al., 2007; Liu et al., 2013; Zanon et al., 2018; Li et al., 2024] широко используется метод многомерного статистического анализа пыльцевых и климатических данных, включающий следующие техники расчета: связанный кластерный анализ; метод Взвешенной средней (WA – Weighted Averaging); метод Взвешенной средней частичных наименьших квадратов (WA-PLS – Weighted Averaging Partial Least Squares); технику Современных аналогов (MAT* – Modern Analogue Technique), метод расчета Поверхности отклика максимальной вероятности (MLRC – Maximum Likelihood response Surfaces). Несмотря на то, что современный растительный покров России в наибольшей степени сохранил черты естественной климатической зональности (по сравнению с Западной Европой и Китаем), данный подход и перечисленные статистические методы у нас в стране до сих пор использовались только для расчета переходных функций между составом современных с.п.с. и количественными климатическими параметрами на арктических территориях Сибири [Klemm et al., 2013]. Представляет интерес применение данного подхода для разработки переходных функций и для другого климатически чувствительного региона – горных районов Южной Сибири.

Горные районы Южной Сибири имеют ярко выраженную высотную зональность растительного покрова, аналогичную зональности на равнинной территории Северной Евразии [Kuminova, 1960; Smagin, 1980; Chytrý et al., 2008], но при меньших расстояниях между границами зон, что создаёт весьма сложную мозаику растительного покрова. Такая сложность растительного покрова долгое время отталкивала палеогеографов от детальных количественных палеореконструкций в горных районах. Мы же рассматриваем Алтай-Саянскую горную область и прилегающие к ней районы как естественную лабораторию для изучения взаимосвязей между растительными ассоциациями и климатическими параметрами не только в настоящем, но и в прошлом. Это связано с положением этой горной области на стыке различных климатических систем, где влажный умеренно континентальный климат Сибири встречается с сухим резко континентальным климатом Монголии. Современные ландшафты этой территории представляют собой мозаику биомов высотных поясов из межгорных степей, горных лесов и альпийских высокогорий в различном сочетании в зависимости от высоты над уровнем моря, экспозиции и климатического градиента снижения влажности и увеличения континентальности климата с северо-запада на юго-восток Алтай-Саянской горной области [Kuminova, 1960; Rankova, Gruza, 2011].

Недавно опубликованы трансферные функции для количественных палеореконструкций, построенные с помощью техники ординации, для гор Центрального Тянь-Шаня [Li et al., 2024], расположенных к юго-западу от исследуемого нами региона. Авторы использовали обширную базу данных современных спорово-пыльцевых спектров [Cao et al., 2022]: (<https://data.tpd.ac/cn/>), включающую 1058 современных пыльцевых спектров, покрывающих территорию в пределах 32°-58° с.ш. и 62°-100° в.д. Однако хотя Алтай-Саянский горный регион входит в означенную территорию, но в указанной базе данных он представлен лишь несколькими современными с.п.с., что не может достаточно хорошо отражать особенности растительного покрова этого региона. Кроме того, растительный покров в работе [Li et al., 2024] оценивался по спутниковым данным NDVI (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>). В нашем же исследовании мы представляем разработку новых трансферных функций для применения их конкретно для палеореконструкций в Алтай-Саянском регионе. Они основаны на дополнительной серии из 145 современных с.п.с., отражающих конкретные биомы и фитоценозы этого региона, связанные с наземными геоботаническими описаниями растительного покрова в точках отбора образцов.

Цель данного исследования состоит в разработке и оценке переходных (трансферных) функций между современными спорово-пыльцевыми спектрами, отобранными в различных растительных ассоциациях из всех высотных поясов Алтай-Саянской горной области, с прилегающими территориями равнин и климатическими параметрами для использования их в палеоэкологических и палеоклиматических реконструкциях в данном регионе на основе палеопалинологических данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор субрецентных (современных) спорово-пыльцевых спектров

Район исследования довольно обширен: около 1100 км в направлении восток-запад и около 800 км в направлении север-юг и включает в себя как равнинные, так и горные территории, хотя в основном он принадлежит Алтае-Саянской горной области. Этот горный регион расположен на юге Западно-Сибирской равнины и Средне-Сибирского плоскогорья. Самые высокие его хребты поднимаются выше 3000-4000 м над уровнем моря и покрыты вечными снегами и ледниками. Нижерасположенные склоны покрыты горными лесами различного состава древесных видов, в зависимости от высоты над уровнем моря, экспозиции и увлажнённости склона. Межгорные котловины покрыты степной растительностью. В наиболее аридных условиях юго-восточного Алтая и Тувы встречаются опустыненные степи. Восточные и северные макросклоны Алтае-Саянской горной области покрыты берёзовыми и сосновыми лесами, переходящими в лесостепи и затем в степи по мере снижения и выравнивания рельефа. В период между 2000 и 2017 гг. было отобрано 145 субрецентных (современных) образцов с 57 участков региона, охватывающих все биомы исследуемой территории, включая прилегающие районы равнин – Алтайский край, Кемеровскую область, юг Томской области, Красноярский край, республики Алтай, Тува и Хакасия. Места отбора проб представлены на карте (Рис. 1). Согласно принятой в палеопалинологических реконструкциях классификации растительного покрова Сибири [Binney et al., 2017], субрецентные пыльцевые спектры были отобраны из 6 биомов: леса на возвышенностях (горные леса), леса на равнинах, лесостепи, степи, опустыненная степь и альпийская тундростепь. В качестве материала отбирались фрагменты напочвенных моховых подушек (польстеров) или фрагменты травяной подстилки и детрита, если мхи отсутствовали. Кроме этого, несколько образцов были представлены озерными отложениями. При отборе материала отмечались географические координаты и высота над уровнем моря, составлялись геоботанические описания окружающего растительного покрова.

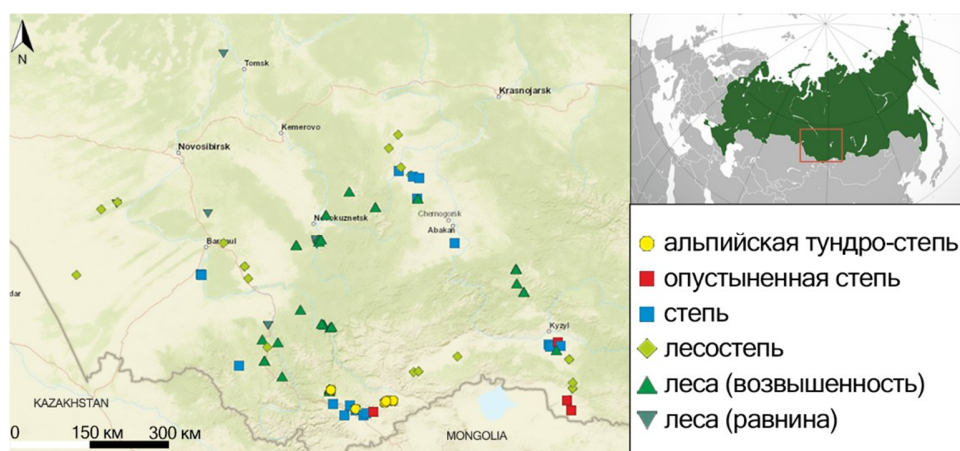


Рисунок 1. Расположение точек отбора современных (субрецентных) спорово-пыльцевых спектров в Алтае-Саянском горном регионе и прилегающих частях равнин (в каждой точке отбиралось от 1 до 6 образцов). Значками обозначены ключевые биомы.

Подготовка материала и спорово-пыльцевой анализ

При химической обработке образцов использовался модифицированный метод фон Поста [Grichuk, Zaklinskaya, 1948], включающий этапы обработки: 10% KOH, сито (300 мкм), HF, 10% HCl, в случаях с большим количеством минеральных частиц использовалась тяжелая жидкость KI + CdI + H₂O. Определение и подсчёт палиноморф проводились при увеличении $\times 400$, образцы окрашивались фуксином. Для определения палиноморф использовали определители [Kupriyanova, 1965; Kupriyanova, Aleshina, 1972, 1978; Bobrov et al., 1983; Moore et al., 1991] и коллекцию пыльцы растений современной

флоры района исследований, имеющуюся в палеоэкологической группе ИМКЭС СО РАН. В каждом образце было подсчитано не менее 250 пыльцевых зерен (лишь в 2 образцах сумма составила 237). Всего было идентифицировано 143 таксона. Для последующего анализа были рассчитаны процентные соотношения таксонов, общая сумма пыльцевых таксонов принималась за 100%. Процент спор рассчитывался относительно этой суммы.

Климатические данные

Климат районов Алтае-Саянской горной области очень разнообразен. Среднегодовая температура приземного воздуха колеблется от +2 до -4°C. Средние температуры января колеблются от -12 до -30°C, средние температуры июля – от 20 до 12°C. Влажность климата меняется от очень влажного и относительно мягкого на западных и северных мегасклонах горной страны (с месячным количеством осадков более 80 мм) до резко континентального влажного и затем резко континентального сухого климата (с месячным количеством осадков менее 20 мм) – в направлении с северо-запада на юго-восток [Kuminova, 1960; Polikarpov et al., 1986; Rankova, Gruza, 2011]. В зимнее время из-за контрастов рельефа и наличия межгорных долин и котловин широко распространены температурные инверсии. В связи с этим самые низкие температуры наблюдаются в Чуйской межгорной котловине, где средняя температура января составляет -31.7°C, абсолютный минимум достигает -60°C [Gvozdetsky, Mikhailov, 1978].

Для оценки соответствия растительности и климата и создания трансферных функций между с.п.с и климатическими параметрами было выбрано пять климатических переменных: TJUL – средняя температура июля, TJAN – средняя температура января, MAT – средняя температура года, MAP – среднегодовое количество атмосферных осадков, GCI – индекс континентальности Горчинского, отражающий степень континентальности климата в конкретном месте отбора образца, который был рассчитан по следующей формуле [Gorzyński, 1920]:

$$GCI = 1.7 \cdot (A - B) / C - 20.4,$$

где А – средняя TJUL за период наблюдений для отмеченного образца, В – средняя TJAN за период наблюдений для отмеченного образца, С – синус географической широты для отмеченного образца.

Для исследования использовались численные данные гидрометеорологических наблюдений сети Росгидромета (<http://www.meteo.ru>), составленные Е.У. Rankova and G.V. Gruza [2011] в виде карт на основе метеорологических данных 8 метеостанций (6 из которых расположены на территории Алтае-Саянской горной области и 2 – на прилегающих равнинных территориях). Для описания современного климата взят период 1976-2005 гг. Кроме того, мы использовали информацию из отечественных геоботанических монографий [Kuminova, 1960; Smagin et al., 1980] о конкретных функциональных типах растительности (фитоценозах), в которых отбирались современные пыльцевые спектры.

Статистические методы, используемые в исследовании

Статистическими методами решались три основные задачи исследования: 1 – выявление особенностей спорово-пыльцевых спектров различных биомов и фитоценозов Алтае-Саянского региона и прилегающих равнин; 2 – выявление основных климатических факторов, влияющих на состав с.п.с., и оценка их пригодности для создания переходных (трансферных) функций; 3 – собственно создание или моделирование трансферных функций, необходимых для палеореконструкций в исследуемом регионе.

При проведении статистической обработки данных мы исключили таксоны, встречающиеся реже чем в 4 спорово-пыльцевых спектрах. Для уменьшения влияния на модель экстремальных значений произведена подготовка данных путём перевода абсолютных значений подсчетов пыльцы и спор в их квадратные корни. В ходе работы выполнены:

1) связанный кластерный анализ для статистической оценки различий в с.п.с. разных природных зон, биомов и фитоценозов Южной Сибири с использованием пакета «rioja» 0.9-21 [Juggins, 2019];

2) DCA (бестрендовый анализ соответствия) для проверки градиента наших образцов по отношению к выбранным экологическим факторам. Длина оси DCA1 составила 1.92, что указывает на допустимость применения методов линейной ординации PCA и DCA [ter Braak, 1994; Birks, 1995];

3) PCA (метод главных компонент) точек отбора проб и отмеченных таксонов для изучения общей структуры калибровочного набора с использованием базового для «r» пакета «stats», а также пакетов «vegan» 2.6-4 [Oksanen et al., 2018] и «ellipse» 0.5.0 [Murdoch et al., 2018];

4) RDA (анализ избыточности) для изучения влияния климатических факторов на распределение данных. Для RDA и дальнейшего анализа из набора данных были исключены таксоны с широким экологическим ареалом;

5) моделирование трансферных функций проведено с помощью пакета R «rioja» 1.0-6 с использованием численных методов WA, WA-PLS, MAT*, MLRC – оцененных методом бутстрэп (Bootstrap Cross-Validation) для выявления наиболее сильной модели для палеореконструкций [Hall, Wilson, 1991; Payne et al., 2012].

Методы построения трансферных функций WA и WA-PLS учитывают нелинейные взаимоотношения видов растений с окружающей средой. Они предполагают, что в благоприятных климатических нишах виды растений имеют наивысшую численность и что ширина ниши определяет экологическую толерантность вида, то есть на исследуемом участке будут доминировать таксоны с оптимумами, близкими к условиям на участке [ter Braak & Juggins, 1993; Valle et al., 2019]. Реконструкции с использованием WA подвержены «краевому эффекту», когда реконструированные значения климатической переменной оказываются смещенными вблизи концов градиента в обучающем наборе. Чтобы уменьшить эту проблему, WA применяет коррекцию предполагаемых значений. Регрессионная модель подгоняется между «реконструированными» и «целевыми» значениями из современных образцов, чтобы оценить, насколько уменьшился диапазон, затем реконструкции масштабируются по отношению к диапазону целевых значений [Chevalier et al., 2020]. Мы попробовали использовать модель вывода WA с понижением веса толерантности, выделяя таксоны с меньшей толерантностью к климатическим переменным.

Метод WA-PLS в меньшей степени подвержен «краевому эффекту». При построении трансферной функции дополнительные компоненты используют «остаточные структуры» видовых данных для уточнения оптимумов с целью получения оценок выборки, которые лучше соответствуют переменной окружающей среды. Количество компонент для использования в WA-PLS оценивается методом перекрестной проверки (cross-validation) и рандомизированным t-тестом.

MAT*, как и другие методы палеореконструкции с использованием трансферных функций, опирается на современный калибровочный набор данных с.п.с. Он использует коэффициенты разнородности для измерения различий между ископаемыми образцами и потенциальными современными аналогами (субрецентными образцами) [Overpeck et al., 1985; Ohlwein, Wahl, 2012]. Для палеоклиматических реконструкций MAT* выбирает «лучший» аналог, который определяется как современный образец, находящийся на наименьшем расстоянии несходства от данного ископаемого образца [Ohlwein, Wahl, 2012]. То есть экологические параметры для каждого ископаемого образца реконструируются, используя как основу параметры «лучших» (наименее несходных с ними) современных образцов-аналогов. Количество современных аналогов с наилучшими показателями выбирается путем сравнения значений R^2 (коэффициентом детерминации между наблюдаемым значением и реконструированным значением) и RMSEP (средним значением квадратической ошибки прогнозирования) для 1-10 ближайших аналогов.

MLRC (поверхности отклика максимальной вероятности) строит кривые отклика с использованием обобщенных линейных моделей, подбирая отдельную модель отклика для каждого таксона. Набор моделей отклика и пропорций таксонов в ископаемых образцах позволяет оценить переменную с помощью метода максимальной вероятности (maximum likelihood) [Oksanen et al., 1988].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты кластерного анализа

Перед анализом все спектры были ранжированы по градиенту высоты от равнинных лесов (внизу диаграммы до высокогорной тундростепи (в верхней части диаграммы) на основе геоботанических описаний соответствующих биомов (Рис. 2). Связанный кластерный анализ всей выборки современных

Лесостепные спектры также представлены двумя кластерами. В первом кластере абсолютно доминирует пыльца берёзы повислой (спектры берёзовой лесостепи равнины). Во втором кластере повышено обилие пыльцы кедра и лиственницы при обилии пыльцы полыни (*Artemisia*). Этот кластер отражает спектры островных степей Алтая, окруженных горными склонами с кедрово-лиственничными горными лесами. В нескольких пылевых спектрах абсолютно доминирует пыльца сосны обыкновенной. Они представляют растительный покров ленточных и островных сосновых боров, окруженных степными пространствами. Во всех лесостепных спектрах повышено обилие пыльцы полыни, злаков и маревых. Степные спектры также представлены двумя кластерами, первый из которых имеет связь с лесостепными спектрами, а второй – с кластером опустыненной степи. Во всех степных спектрах повышено обилие пыльцы полыни, маревых и злаков и в различной степени древесных видов в зависимости от места отбора образцов. Кластер с.п.с. опустыненной степи имеет связь со степными спектрами, отличаясь максимальным обилием пыльцы полыни и маревых при минимальном обилии пыльцы древесных видов. Спектры высокогорной тундростепи отличаются повышенным обилием пыльцы осок (*Carex*) и злаков (Poaceae). Часть из них содержит много пыльцы полыни, а другая часть – много пыльцы карликовой берёзки (*Betula nana*). Обилие пыльцы кедра во многих спектрах этой группы тоже повышено за счет заноса её из ближайших кедровых лесов, произрастающих у верхней границы

лесного пояса. Таким образом, кластерный анализ изученных спорово-пыльцевых спектров четко выявил как высотную поясность растительного покрова (биома), так и конкретные фитоценозы (функциональные типы растительности), в которых отбирались образцы.

Результаты анализа методом главных компонент (PCA)

Для PCA были использованы только таксоны, представленные не менее чем в 4 спорово-пыльцевых спектрах. Результаты PCA-анализа четко распределяют пыльцевые типы по биомам: равнинных лесов; горных лесов; лесостепи; степей; опустыненной степи и альпийской тундростепи (Рис. 3). Судя по распределению видов и их экологии, ось 1, объясняющая 7.2% вариабельности спектров, отражает градиент влажности, а ось 2, объясняющая 6.2% вариабельности, связана с градиентом температуры. Соответственно этим градиентам распределились типы палиноморф. Выделяются поля соответствующих биома, которые на рисунке 3 обозначены разными значками и цветом овалов. Так, в наиболее влажных и тёплых условиях в правой верхней четверти графика PCA расположены палиноморфы, характерные для биома равнинных лесов и горных темнохвойных и черневых лесов с обилием пихты (*Abies sibirica*), берёзы (*Betula pendula*) и липы (*Tilia*) с высокотравно-папоротниковым травяным покровом. В холодных и сухих условиях (левая нижняя четверть графика PCA) расположены палиноморфы биома альпийской тундростепи (желтый овал) и опустыненной степи (розовый овал). Биомы равнинных лесов, горных темнохвойных и черневых лесов практически не пересекаются с биомами альпийской тундростепи и опустыненной степи на графике PCA.

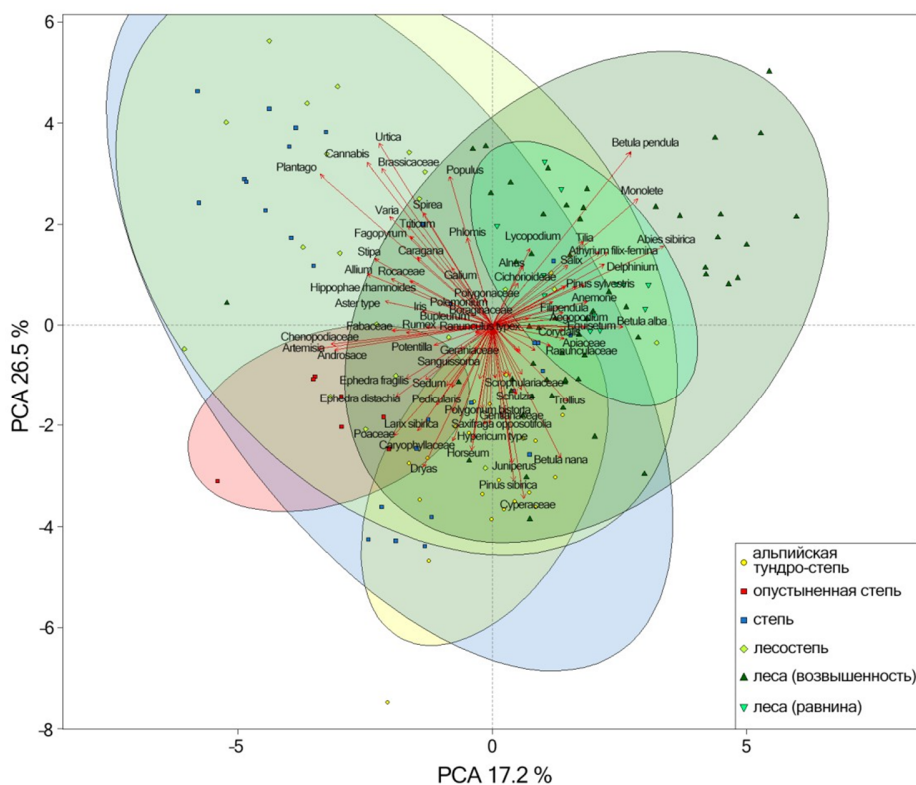


Рисунок 3. Биplot анализа методом главных компонент (PCA) выборки из 145 современных спорово-пыльцевых спектров Алтае-Саянского региона и прилегающих частей равнин. Значками и цветом овалов обозначены с.п.с. различных биома на территории исследования.

Но в целом биом горных лесов (зелёный овал) имеет гораздо более широкие экологические границы по сравнению с первым, пересекаясь со всеми биомами региона исследования, что отражает комплексную природу растительного покрова Алтае-Саянского региона. Также широкую амплитуду толерантности к экологическим условиям демонстрирует биом степи (голубой овал). Биом лесостепи

(светло-зелёный овал) в большей части совпадает с биомами степи по экологическим требованиям, но несколько сдвинут в сторону лесного биома от биома альпийской тундростепи и опустыненной степи. На РСА-графике в левой верхней четверти хорошо выделяются пыльцевые типы, маркирующие антропогенное влияние: *Triticum*, *Urtica*, *Cannabis*, *Fagopirum*. Экологические условия произрастания этих растений менее влажные, чем в черневых и темнохвойных горных лесах, но более мягкие и влажные, чем в опустыненной степи и в высокогорной тундростепи. То есть в исследуемом регионе человек освоил для земледелия и проживания (судя по присутствию пыльцы антропогенных индикаторов) наиболее благоприятные по климату районы степного и лесостепного биомов.

Результаты анализа методом избыточности (RDA)

RDA-метод был использован для изучения влияния климатических факторов на состав спорово-пыльцевых спектров и для выявления факторов статистически пригодных для построения переходных (трансферных функций). RDA-анализ был выполнен для 6 климатических параметров: TJUL, MAP, TJAN, MAT, GCI и Altitude (средняя температура июля, средняя температура года, средняя температура января, среднегодовое количество атмосферных осадков, индекс континентальности Горчинского и высота над уровнем моря соответственно) (Рис. 4 А). График RDA выявил положительную корреляцию между MAP и TJAN, а также с пыльцой *Abies sibirica* и спорами папоротника (*Monolete*), что четко отражает распространение темнохвойной высокотравно-папоротниковой горной тайги и черневых лесов с пихтой, осиной и липой на западном макросклоне Кузнецкого Алатау и на северном макросклоне Западного Саяна (без липы) в районах с максимальным количеством атмосферных осадков и более мягкими зимами с обильным снежным покровом. Положительная корреляция обнаружена между фактором Altitude и пыльцой *Pinus sibirica*, *Betula nana* и *Cyperaceae*, что отражает климатические условия верхней части пояса горных лесов и субальпийского пояса разреженных кедровников с зарослями *Betula nana*, осоки и участками альпийских лугов. Пыльца ксерофитных растений из таксонов *Artemisia* и *Chenopodiaceae* сильно положительно коррелирует с континентальностью климата Горчинского (GCI). Пыльца злаков *Poaceae* в равной степени коррелирует с факторами GCI и Altitude, отражая распространение злаков как в высокогорных тундрах, так и в степях. В Юго-Восточном Алтае и в Туве эти факторы (GCI и Altitude), действуя совместно, создают условия для сохранения реликтового типа растительности ледникового периода – тундростепи. Среди древесной пыльцы максимальную положительную корреляцию с MAT имеет пыльца *Pinus sylvestris* и *Betula pendula*. С совмещенными факторами TJAN+MAP эти виды коррелируют в меньшей степени, но также положительно. Сильную отрицательную корреляцию они имеют с факторами GCI и Altitude.

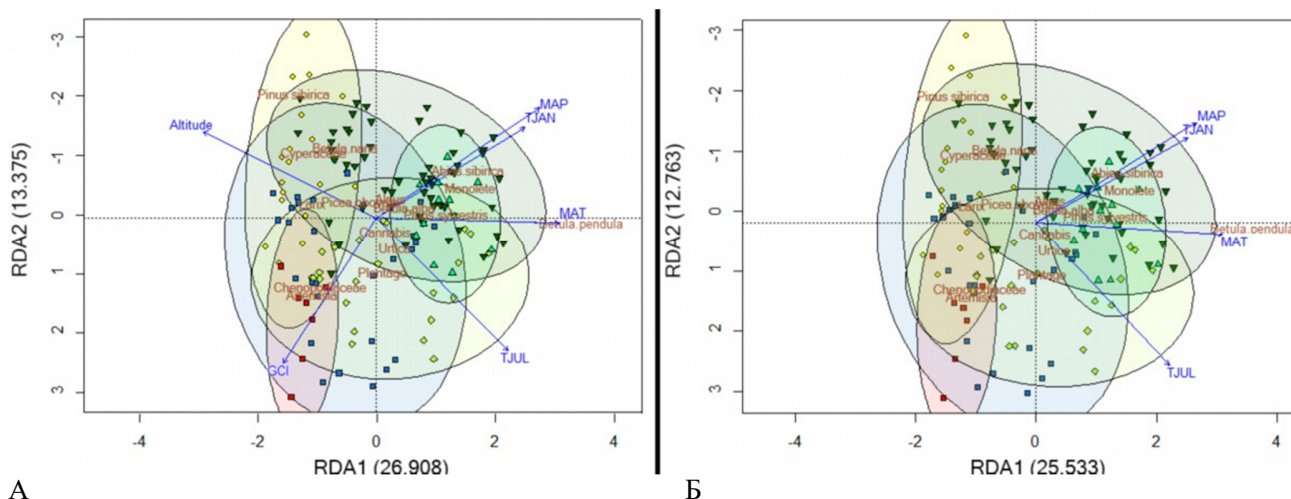


Рисунок 4. Биplotы RDA-анализа выборки из 145 современных спорово-пыльцевых спектров Алтае-Саянского региона и прилегающих частей равнин. А – до теста VIF, Б – после теста VIF (условные обозначения см. на Рис. 3).

Интересно, что пыльца антропогенных индикаторов, таких как *Plantago*, *Urtica*, *Cannabis*, также сильно коррелирует с TJUL. Это означает, что высокие значения средней температуры июля (TJUL) являются свойством ландшафтов, наиболее пригодных для сельскохозяйственного освоения человеком. Именно температура вегетационного сезона наиболее важна для успешного выращивания урожая в зоне рискованного земледелия, каковой является Сибирь. С MAP у антропогенных компонентов корреляция тоже положительная, но очень слабая. В то же время высокогорные, резко континентальные и излишне увлажнённые районы Алтае-Саянской горной области для земледелия непригодны, и в с.п.с. этих районов отсутствует пыльца антропогенных индикаторов.

Собственные значения пропорций, объясняющих вариабельность и оценки R^2 , оказались довольно низкими в RDA, и мы провели тест на выявление факторов инфляции дисперсии (Variance Inflation Factors – VIF), чтобы проверить, все ли выбранные нами климатические факторы объясняют вариабельность спорово-пыльцевых спектров. На рисунке 4 представлено два графика RDA: А – до теста VIF, Б – после теста VIF. Если значение VIF исследуемого фактора было больше 10, то это означало, что данный климатический фактор сильно коррелирует с другими факторами и индивидуально объясняет малую долю вариабельности данных [ter Braak, 1988]. На рисунке 4Б показаны те климатические факторы, которые прошли тест VIF и по статистическим законам рекомендуются для построения переходных функций. Таковыми оказались TJUL, MAT, TJAN и MAP (средняя температура июля, средняя температура года, средняя температура января и среднегодовое количество осадков соответственно). Фактор GCI (индекс континентальности Горчинского) и фактор Altitude (высота над уровнем моря) не прошли теста VIF. Эти два фактора оказались сильно связаны друг с другом и с MAT, поэтому использовать их для построения трансферной функции не рекомендуется. Модели на их основе будут статистически незначимы, поскольку не определена доля их участия в совместном влиянии факторов Altitude, GCI и MAT. Статистически значимые факторы могут быть использованы для построения трансферных функций, а незначимые – не могут. Тем не менее высота над уровнем моря – это важный фактор в экологии растительных сообществ. Эмпирически известно, что температура в горах Алтая изменяется вдоль высотных градиентов. Так, TJUL понижается с поднятием в горы, а TJAN, наоборот, повышается до определённого уровня за счет явления зимних температурных инверсий. Так же с поднятием в горы увеличивается MAP с 133 мм/год, согласно данным метеостанции Кош-Агач (1750 м н.у.м.), до 539 мм/год – на метеостанции Актру (2150 м н.у.м.). Это объясняет сильную негативную корреляцию факторов Altitude и TJUL на левом RDA-графике. Корреляция Altitude с MAP и TJAN менее сильная, но тоже отрицательная. Таким образом, модель (переходная функция) для Altitude (если игнорировать рекомендации статистики) в горах Алтая будет отражать как высоту над уровнем моря, так и влияние MAT, TJUL и MAP. То же касается модели GCI. Мы также выявили долю совместного и индивидуального вклада статистически значимых климатических факторов в вариабельность с.п.с. Оказалось, что TJUL является наиболее независимым (от других факторов) климатическим фактором, контролирующим максимальную долю вариабельности – 10,6%. Это может быть связано с доминирующим влиянием географической широты на растительный покров и его с.п.с. В то же время влияние MAP и TJAN оказалось значительно слабее, составляя 3.5 и 2.7% соответственно. Оба этих фактора контролируются влиянием западных влагоносных воздушных течений, обеспечивающих атмосферными осадками Алтае-Саянскую горную область, и поэтому эти факторы (MAP и TJAN) сильно связаны.

Таким образом, проведённый статистический анализ 145 современных с.п.с. с территории Алтае-Саянской горной области и прилегающих районов равнин показал, что их состав адекватно отражает высотные и температурно-влажностные градиенты, несмотря на сложную комплексную структуру растительного покрова, и представленная серия с.п.с. применима для обучающей выборки в создании трансферных (переходных) функций для использования их в палеореконструкциях на основе палеопалинологических данных. По статистическим законам значимые модели можно построить для факторов TJUL, MAT, TJAN и MAP.

Трансферные функции

Мы создали четыре типа моделей вывода для нашей обучающей выборки с.п.с. на основе температурно-влажностных показателей климата. Характеристики работы четырех типов трансферных

функций (WA, WAPLS, MAT* и MLRC) для 5 переменных (MAT, MAP, TJAN, TJUL и GCI), построенных на обучающей выборке из 145 спорово-пыльцевых спектров Алтае-Саянского региона и климатических параметров, соответствующих каждому спектру, показаны в таблице 1. Для большинства экологических параметров наилучшие результаты показала модель MAT* со значениями t-критериев R^2 в пределах 0.74-0.83 и ошибками 1.2° для MAT, 137 мм для MAP, 2.7° для TJAN и 6.7 для GCI (Табл. 1). Количество аналогов, использованных для достижения наилучших результатов в MAT*, составило 5. Единственным исключением стал TJUL, где наибольший R^2 и наименьший RSME были получены для модели MLRC ($R^2 = 0.7268$, RMSE = 1.6819°C). То есть для реконструкции среднегодовых температур (MAT), среднеянварских температур (TJAN) и годового количества осадков (MAP) рекомендуется использовать модель MAT*, а для реконструкции среднеиюльских температур (TJUL) лучшие результаты даёт модель MLRC. При проверке моделей методом бутстрэп все значения RMSE составили: 1.18-1.33°C для MAT; 136.33-152.88 мм для MAP; 2.74-3.68°C для TJAN; 1.55-1.71°C для TJUL и 6.75-9.27 для GCI (Табл. 1).

Таблица 1. Характеристики моделей трансферных функций

	WA		WAPLS		MAT*		MLRC	
Parameters	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
MAT	0.6792	1.2255	0.72254	1.1812	0.7574	1.2382	0.7308	1.3298
MAP	0.6516	136.33	0.6515	136.43	0.7447	137.04	0.6366	152.88
TJAN	0.5876	3.2174	0.663	3.0424	0.8247	2.743	0.5863	3.6722
TJUL	0.6325	1.6378	0.6909	1.5563	0.691	1.7044	0.7268	1.6819
GCI	0.5251	8.1331	0.5253	8.1502	0.8153	6.7586	0.5466	9.265

Сравнение выявленных статистических связей и созданной модели переходной функции с другими авторами

К настоящему времени опубликовано всего несколько статей, касающихся современных спорово-пыльцевых спектров Южной Сибири, но полученные нами результаты хорошо согласуются с опубликованными [Pelànkova et al., 2008]. Среди подтверждённых закономерностей отметим следующие: 1. Повышение обилия пыльцы *Artemisia*, *Roaceae*, *Betula pendula*, *Pinus sibirica*, *P. sylvestris* является наилучшим индикатором состава растительности, типа ландшафта и климатических характеристик в горах Южной Сибири; 2. Большое обилие пыльцы *Artemisia*, *Roaceae*, *Chenopodiaceae* и присутствие пыльцы *Ephedra* является индикатором степей; 3. Доминирование пыльцы *Pinus sibirica*, *P. sylvestris* и *Abies* в с.п.с. разделяет разные типы хемибореальных лесов. В дополнение к этому наши исследования показали, что повышенное обилие пыльцы *Pinus sibirica*, отмеченное в с.п.с. у верхней границы леса, индицируют более влажные условия и более низкие температуры июля. Пыльца *Betula pendula*, по данным [Pelànkova et al. 2008], является индикатором влажных условий. Наши же данные свидетельствуют о том, что берёза, кроме достаточной влажности климата, предпочитает более тёплые летние и зимние температуры, что хорошо согласуется с распространением сосновых и берёзовых лесов в низкогорьях Алтая. Напротив, пыльца *Larix* является индикатором более сухих условий и более низких температур января, что отражает распространение лиственницы в Центральном Алтае на больших относительных высотах и в условиях более континентального и сухого климата.

Рассматривая статистические закономерности связи современных с.п.с. Алтае-Саянского региона и прилегающих районов равнин с климатическими параметрами, выявленными в данном исследовании, напомним, что максимально независимое влияние на вариабельность спектров здесь оказывает фактор TJUL, который объясняет 10,6% вариабельности, далее идёт фактор MAP (3,5%) и затем фактор TJAN

(2,7%). Если сравнить эти данные с аналогичными, опубликованными для Центрального Тянь-Шаня [Li et al., 2024], то в них максимально независимое влияние на растительность и современные с.п.с. оказывает фактор MAP (обозначенный как R_{ann} в оригинальной публикации), объясняющий 15% вариабельности. Затем следуют фактор TJAN (9,3%) и фактор TJUL (4,3%). Таким образом, статистические исследования современных с.п.с. в их связи с климатическими параметрами показали, что в Алтае-Саянских горах Южной Сибири ведущим климатическим фактором, контролирующим вариабельность с.п.с. и, следовательно, материнской растительности, является температура вегетационного периода, выражением которой является TJUL, а в горах Центрального Тянь-Шаня таким фактором является годовое количество атмосферных осадков – MAP. Это хорошо отражает природные закономерности более северного и холодного Алтая и более южного с более жарким континентальным климатом Тянь-Шаня. Учитывая разные ведущие факторы, контролирующие вариабельность с.п.с. в двух рассматриваемых регионах, создание отдельных трансферных функций для Алтае-Саянского горного региона оправдано и необходимо.

Модель переходной функции для TJUL, созданная нами методом MLRC ($R^2=0.7268$ и $RMSE=1.68^\circ C$) на основе представленной в данной работе обучающей выборки с.п.с., является достаточно сильной и сравнимой с опубликованными ранее моделями. Градиент изменения TJUL в исследованном регионе составляет $5.6-20.8^\circ C$. Статистически полученная нами модель сравнима и даже несколько сильнее ранее опубликованной модели переходной функции для t° июля арктической зоны Сибири [Klemm et al., 2013], где температурный градиент равен $7.5-18.7^\circ C$, а $R^2=0.61$ и $RMSE=1.57^\circ C$. Что касается опубликованных к настоящему времени других переходных функций для палеореконструкций на основе палеопалинологических данных для Евразийского континента, то в них использовались иные подходы оценки растительного покрова, при которых растительный покров определялся преимущественно на основе оценки космических снимков, а не на основе конкретных геоботанических описаний в точках отбора современных с.п.с. Так были созданы переходные функции для оценки доли лесного покрова в Северной Азии [Tarasov et al., 2007] с характеристиками модели $R^2=0.77$ и $RMSE=11.69$; для оценки NDVI в Северном Китае [Liu et al., 2013] с силой модели $R^2=0.62$ и Внутренней Монголии [Chen et al., 2019] с характеристикой модели $R^2=0.72$ и $RMSE=0.08$; для реконструкции доли лесного покрова в Восточноазиатском регионе [Tian et al., 2016] с характеристикой модели $R^2=0.66$ и $RMSE=9.18$; для реконструкции лесного покрытия в Европе [Zanon et al., 2018] с силой модели $R^2=0.75$; для оценки степени фракционированности растительного покрова в Центральном Тянь-Шане и прилегающих территориях [Li et al., 2024] с силой модели $R^2=0.78$ и $RMSE=0.12$.

Таким образом, созданная нами модель переходной функции сравнима по статистической достоверности с ранее опубликованными, но более точна в плане отражения экологических потребностей конкретных видов растений и растительных сообществ, распространённых в Алтае-Саянском регионе, поскольку она основана на конкретных геоботанических описаниях в точках отбора спорово-пыльцевых спектров, составляющих обучающую выборку модели.

ВЫВОДЫ

Многомерный статистический анализ 145 современных спорово-пыльцевых спектров с территории Алтае-Саянской горной области и прилегающих районов равнин, проведённый с помощью техник кластерного анализа PCA и RDA, показал, что их состав адекватно отражает высотные пояса растительного покрова и температурно-влажностные градиенты, существующие на этой территории, а также состав материнских фитоценозов. Следовательно, несмотря на сложную комплексную структуру растительного покрова, представленная серия с.п.с. может применяться в качестве обучающей выборки в построении трансферных (переходных) функций для использования их в палеореконструкциях на основе палеопалинологических данных.

Проведенный статистический анализ показал, что по представленной выборке современных с.п.с. значимые модели можно построить для факторов TJUL, MAT, TJAN и MAP. Из 4 типов моделей (WA, WAPLS, MAT* и MLRC), созданных нами для 5 переменных (MAT, MAP, TJAN, TJUL и GCI) на основе представленной выборки с.п.с., наилучшие результаты моделей получены методом MAT* для факторов MAT, MAP, TJAN и GCI. Однако наиболее сильной оказалась модель переходной функции для TJUL,

созданная методом MLRC ($R^2=0.7268$ и $RMSE=1.68^\circ C$). По характеристикам эта модель сопоставима с ранее опубликованными моделями других авторов, созданными для реконструкции среднеиюльской температуры арктической зоны Сибири и для реконструкции таких характеристик растительного покрова, как облесённость, NDVI и фракционированность.

Дальнейший статистический анализ наших данных и сопоставление полученных результатов с опубликованными по соседнему региону (Центральный Тянь-Шань) показали, что в Алтае-Саянских горах Южной Сибири ведущим климатическим фактором, контролирующим вариабельность спорово-пыльцевых спектров, является температура вегетационного периода, выражением которой является TJUL, а в горах Центрального Тянь-Шаня таким фактором является годовое количество атмосферных осадков – MAP. Это хорошо отражает природные географические закономерности зависимости растительности от климата в более северном и холодном Алтае и в более южном с жарким континентальным климатом Тянь-Шане. Учитывая разные ведущие факторы, контролирующие вариабельность с.п.с. в двух рассматриваемых регионах, вновь созданные трансферные функции можно рекомендовать для палеоклиматических реконструкций в Алтае-Саянском регионе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке бюджетного проекта ИМКЭС СО РАН № FWRG-2021-0003. Авторы благодарны Бляхарчуку Павлу Анатольевичу за помощь при сборе современных пыльцевых спектров в экспедициях.

ЛИТЕРАТУРА

- Abatzoglou J.T., Williams A.P., Barbero R. 2019. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices. *Geophysical Research Letters*, 46 (1): 326-336.
- Binney H., Edwards M., Macias-Fauria M., Lozhkin A., Anderson P., Kaplan J. O., Andreev A., Bezrukova E., Blyakharchuk T., Jankovska V., Khazina I., Krivonogov S., Kremenetski K., Nield J., Novenko E., Ryabogina N., Solovieva N., Willis K., Zernitskaya V. 2017. Vegetation of Eurasia from the last glacial maximum to present: Key biogeographic patterns. *Quaternary Science Reviews*, 157: 80-97. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.11.022>.
- Birks H.J. B. 1995. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions. In: *Statistical Modelling of Quaternary Science Data. Technical Guide* (D. Maddy, J.S. Brew, eds.), vol. 5. pp. 161-254. Quaternary Research Association, Cambridge.
- Bobrov A.E., Kupriyanova L.A., Litvintseva M.V., Tarasevich V.F. *Spores of ferns and pollen of pteridophyta and monocotyledonous plants of the flora of the European part of the USSR*. Nauka, L., 1983. 208 pp. [Бобров А.Е., Куприянова Л.А., Литвинцева М.В., Тарасевич В.Ф. 1983. Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры европейской части СССР. Ленинград: Наука. 208 с.].
- Brushlinsky N.N., Wagner P., Sokolov S.V. 2003. The problem of fires in the world at the beginning of the XXI century. *Fire and Explosion Safety*, 12 (1): 7–14 (in Russian). [Брушлинский Н.Н., Вагнер П., Соколов С.В. 2003. Проблема пожаров в мире в начале XXI столетия // Пожаровзрывобезопасность Т. 12, № 1. С. 7-14].
- Cao X., Tian F., Xu Q., Ni J., Herzshuh U. 2022. *Modern Pollen Dataset for Asia*. National Tibetan Plateau Data Center. URL: <https://doi.org/10.11888/Paleoenv.tpd.272378> (Last accessed 30.09.2024).
- Chevalier M., Davis B.A.S., Heiri O., Seppä H., Chased B.M. Gajewski K., Lacourse T., Telford R.J., Finsinger W., Guiot J., Kühl N., Maezumi S.Y., Tiptonm J.R., Carter V.A., Brussel T., Phelps L.N., Dawson A., Zanon M., Vallé F., Nolan C., Mauri A., de Vernal A., Izumi K., Holmström L., Marsicek J., Goring S., Som mer P.S., Chaput M., Kupriyanov D. 2020. Pollen-based climate reconstruction techniques for late Quaternary studies. *Earth-Science Reviews*, 210: 103384. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103384>.
- Chen D.X., Wang W., Liu L.N., Jiang Y.J., Li Y.Y., Niu Z.M., Ma Y.Y., He J. 2019. Lake central surface sediment based pollen-vegetation cover transfer functions and its application in Inner Mongolia Plateau and adjacent area. *Arid Land Geography* 42 (5): 1011-1022.
- Chytrý M., Danihelka J., Kubešová S., Lustyk P., Ermakov N., Hájek M., Hájková P., Kočí M., Otýpková Z., Roleček J., Řezníčková M., Šmarda P., Valachovič M., Popov D., & Pišút I. 2008. Diversity of forest vegetation across a strong gradient of climatic continentality: Western Sayan Mountains, southern Siberia. *Plant Ecology* 196: 61-83.
- Gallego-Sala A. V. et al. (75 coauthors). 2018. Latitudinal limits to the predicted increase of the peatland carbon sink with warming. *Nature Climate Change* 8: 907-913.
- Gorzyński L. 1920. Sur le calcul du degré du continentalisme et son application dans la climatologie. *Geografiska Annaler*, 2: 324-331.

- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. *Analysis of fossil pollen and spores and their application in paleogeography*. Geografiz, Moscow, 223 pp. (in Russian). [Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемой пыльцы и спор и их применение в палеогеографии. Москва: Географиз. 223 с.].
- Gvozdetzky N.A., Mikhailov N.I. 1978. *Physical Geography of the USSR. Asian part: textbook for students of geographical faculty of universities*. Mysl', Moscow, 512 pp. (in Russian). [Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. 1978. Физическая география СССР. Азиатская часть : учебник для студентов географического факультета университетов. М.: Мысль. 512 с.].
- Hall P., Wilson S.R. 1991. Two guidelines for bootstrap hypothesis testing. *Biometrics* 47: 757-762.
- Harrison S.P., Prentice I.C., Bloomfield K.J., Dong N., Forkel M., Forrest M., Ningthoujam R.K., Pellegrini A., Shen Y., Baudena M., Cardoso A.W., Huss J.H., Joshi J., Oliveras I., Pausas J.G., Simpson K.J. 2021. Understanding and modelling wildfire regimes: an ecological perspective. *Environmental Research Letters* 16 (12): 125008.
- Jiang W., Guiot J., Chu G., Wu H., Yuan B., Hatté C., Guo, Z. 2010. An improved methodology of the modern analogs technique for palaeoclimate reconstruction in arid and semi-arid regions. *Boreas*, 39: 145-153.
- Juggins S. 2019. Rioja: Analysis of Quaternary Science Data, R package version (0.9–21). URL: <http://cran.r-project.org/package=rioja> (Last accessed 30.09.2024).
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Im S.T., Golyukov A.S. 2019. Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian Permafrost Zone. *Regional Environmental Change*, 19(1): 233-243. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-140>.
- Kharuk V.I., Dvinskaya M. L., Petrov I.A., Im S.T., Ranson K.J. 2015. Larch forests of Middle Siberia: Long-term trends in fire return intervals. *Environmental Research Letters*, 16: 2389-2397. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0964-9>.
- Klemm J., Herzschuh U., Pisarcic M. F. J., Telford R. J., Heim B., Pestryakova L. A. 2013. A pollen-climate transfer function from the tundra and taiga vegetation in Arctic Siberia and its applicability to a Holocene record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 386: 702-713.
- Kukavskaya E., Soja A., Petkov A., Ponomarev E., Ivanova G., Conard S. 2013. Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption. *Canadian Journal of Forest Research* 43: 493-506. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0367>.
- Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., Kalenskaya O.P. 2016. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia. *Forest Ecology and Management* 382: 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.foreco>.
- Kuminova A.V. 1960. *Vegetation cover of Altai*. SO AS, Novosibirsk, 450 pp. (in Russian). [Кумина А.В. 1960. Растительный покров Алтая. Новосибирск: Изд-во. СО АН. 450 с.].
- Kupriyanova L.A. 1965. *Paleontology of the earwigs*. Nauka, Leningrad, 215 pp. [Куприянова Л.А. 1965. Палинология серёжкоцветных. Л.: Наука. 215 с.].
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. 1972. *Pollen and spores of plants of the flora of the European part of the USSR*. Nauka, Leningrad, Vol. 1, 171 pp. [Куприянова Л.А., Алёшина Л.А. 1972. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука. Т. 1. 171 с.].
- Kupriyanova L.A., Aleshina L.A. 1978. Pollen of dicotyledonous plants of the flora of the European part of the USSR. Leningrad, Nauka, Vol. 2, 184 pp. [Куприянова Л.А., Алёшина Л.А. 1978. Пыльца двудольных растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука. Т. 2. 184 с.].
- Li X., Sun A., Yang Y., Zhang D. Wu S. 2024. Modern pollen-vegetation coverage relationships and its application for Holocene vegetation reconstructions in the central Tianshan Mountains. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 635: 111963. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2023.111963>.
- Liu G., Yin Y., Liu H. Y., Hao Q. 2013. Quantifying regional vegetation cover variability in North China during the Holocene: Implications for climate feedback. *PloS One* 8 (8): e71681.
- Lu H., Wu N., Liu K., Zhu L., Yang X., Yao T., Wang L., Li Q., Liu X., Shen C., Li X., Tong G., Jiang H. 2011. Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes. *Quaternary Science Reviews* 30: 947–966.
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson, M.E. 1994. *Pollen analysis*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 217 pp.
- Murdoch D., Chow E.D., Celayeta J.M. F. 2018. Ellipse: Functions for Drawing Ellipses and Ellipse-Like Confidence Regions, R package version (0.4.1). URL: <https://CRAN.Rproject.org/package=ellipse> (Last accessed 09.2024).
- Ohlwein C., Wahl E. R. 2012. Review of probabilistic pollen-climate transfer methods. *Quaternary Science Reviews* 31: 17-29.
- Oksanen J., Blanchet F.G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P.R., O'Hara R.G., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E., Wagner H. 2018. Vegan: Community Ecology Package. R Package version (2.5-2). URL: <http://CRAN.Rproject.org/package=vegan> (Last accessed 09.2024).
- Oksanen J., Laara E., Huttunen P., Meriläinen J. 1988. Estimation of pH optima and tolerances of diatoms in lake sediments by the methods of weighted averaging least squares and maximum likelihood and their use for the prediction of lake acidity. *J. Paleolimnol* 1: 39-49. <https://doi.org/10.1007/BF00202192>.
- Overpeck J.T., Webb III T., Prentice I.C. 1985. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quaternary Research* 23: 87-108.
- Payne R.J., Telford R.J., Blackford J.J., Blundell A., Booth R.K., Charman D.J., Lamentowicz L., Lamentowicz M., Mitchell E.A.D., Potts G., Swindles G.T., Warner B.G., Woodland W. 2012. Testing peatland testate amoeba transfer functions: Appropriate methods for clustered training-sets. *The Holocene* 22(7): 819-825.
- Pelánková B., Kuneš P., Chytrý M., Jankovská V., Ermakov N., Svobodová-Svatavská H. 2008. The relationships of modern pollen spectra to vegetation and climate along a steppe forest tundra transition in southern Siberia, explored by decision trees. *The Holocene* 18 (8): 1259-1271.

- Polikarpov N.P., Chebakova N.M., Nazimova D.I. 1986. *Climate and mountain forests of South Siberia*. Nauka, Novosibirsk, 225 pp. (in Russian). [Поликарпов Н.П. Чебакова Н.М., Назимова Д.И. 1986. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука. 225 с.].
- Rankova E.Y., Gruza G.V. 2011. Climate change in the Russian part of the Altai-Sayan Ecoregion. In *Assessment Report. Climate Change and its Impact on Ecosystems, Population and Economy in the Russian Part of the Altai-Sayan Ecoregion*, (A.O. Kokorin, ed.) pp. 15-32, WWF Russia Moscow Press, Moscow (in Russian). [Ранькова Э.Я., Груза Г.В. 2011. Изменения климата в российской части Алтае-Саянского экорегиона // Оценочный доклад. Изменения климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона / под ред. А. О. Кокорина. М.: WWF России. С. 15-32].
- Seppä H., Birks H. J. B., Odland A., Poska A. and Veski S. 2004. A modern pollen-climate calibration set from northern Europe: developing and testing a tool for palaeoclimatological reconstructions. *Journal of Biogeography* 31: 251-267.
- Smagin V.N., Ilyinskaya S.A., Nazimova D.I., Novoseltseva I.F., Cherednikova Y.S. 1980. *Types of forests of the mountains of southern Siberia*. Nauka, Novosibirsk, 336 pp. (in Russian). [Смагин В.Н., Ильинская С.А., Назимова Д.И., Новосельцева И.Ф., Чередникова Ю.С. 1980. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука. 336 с.].
- Tarasov P., Williams J.W., Andreev A., Nakagawa T., Bezrukkova E., Herzschuh U., Igarashi Y., Muller S., Werner K., Zheng Z. 2007. Satellite- and pollen-based quantitative woody cover reconstructions for northern Asia: Verification and application to Late-Quaternary pollen sat. *Earth Planet. Sci. Lett.* 264: 282-298.
- Tian F., Cao X.Y., Dalimeyer A., Zhao Y., Wang Y.D., Herzschuh U. 2016. Quantitative woody cover reconstructions from eastern continental Asia of the last 22 kyr reveal strong regional peculiarities. *Quat. Sci. Rev.* 137: 33-44.
- ter Braak, C.J.F., Prentice I.C. 1988. A theory of gradient analysis. *Adv. Ecol. Res.* 18, 271-317.
- ter Braak, C.J.F., Juggins, S. 1993. Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): an improved method for reconstruction environmental variables from species assemblages. *Hydrologia* 269-270: 485-502. <https://doi.org/10.1007/BF00028046>.
- ter Braak C. J. F. 1994. Canonical community ordination. Part 1: basic theory and linear methods. *Ecoscience* 12: 127-140.
- Vallè F., Furlanetto G., Maggi V., Pini R., Ravazzi C. 2019. Concepts and methodology to quantitatively reconstruct climate from pollen data. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 42, 225-234. DOI:10/4461/GFDQ/2019.42.12.
- Wei H., Zhao Y. 2016. Surface pollen and its relationships with modern vegetation and climate in the Tianshan Mountains, northwestern China. *Veget Hist Archaeobot* 25:19-27.
- Zanon M., Davis B.A.S., Marquer L., Brewer S., Kaplan J. O. 2018. European Forest Cover During the Past 12,000 Years: A Palynological Reconstruction Based on Modern Analogs and Remote Sensing. *Front. Plant Sci.* 9: 253.

Поступила в редакцию: 05.08.2024
Переработанный вариант: 01.09.2024

FEATURES OF DISTRIBUTION OF A NUMBER OF RARE AND PROTECTED PLANT SPECIES IN THE TERRITORIES OF OLIGOTROPHIC AND MESOTROPHIC MIRES WITHIN OIL FIELDS OF KHANTY-MANSI AUTONOMOUS AREA – YUGRA

Shishkonakova E.A.

Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва

shishkonakova_ea@esoil.ru

Citation: Shishkonakova E.A. 2024. Features of distribution of a number of rare and protected plant species in the territories of oligotrophic and mesotrophic mires within oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(2): 98-104.

DOI: 10.18822/edgcc635945

Техногенная трансформация олиготрофных и мезотрофных болот, происходящая в процессе функционирования инфраструктуры нефтяных месторождений, приводит к возникновению новых местообитаний с принципиально иными условиями, ранее для данных биогеоценозов нехарактерными. Расширение площадей эвтрофированных почв, загрязнение нефтью и хлоридами, последующие рекультивационные мероприятия, создание насыпей из минерального грунта – все эти типы нарушений создают предпосылки для исчезновения редких растений, однако параллельно отмечается внедрение новых видов, также имеющих охранный статус. Трансформированные участки болот могут становиться рефугиумами для исчезающих и находящихся под охраной растений. В статье приводится характеристика ряда трансформированных местообитаний, возникших на болотных массивах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, в пределах которых были найдены редкие и охраняемые виды.

Ключевые слова: трансформация болот, торфяные почвы, загрязнение, эвтрофикация, Красная книга, рефугиумы для редких растений.

*The technogenic transformation of oligotrophic and mesotrophic mires, which occurs during the functioning of the infrastructure of oil fields, leads to the emergence of new habitats with fundamentally different conditions, previously uncharacteristic for these biogeocenoses. Expansion of areas of eutrophicated soils, pollution with oil and chlorides, subsequent reclamation measures, the formation of embankments from mineral soil – all these disturbance types create the preconditions for the disappearance of rare plants, however, in parallel, the introduction of new species that also have a protected status is noted. Transformed areas of mires can become refugia for endangered and protected plants. Three groups of plants can be distinguished, related to the nature of the technogenically transformed substrates on which they settle. The first group includes plants that settle exclusively on peat, the second includes species found on mineral substrates introduced into mires, the third group includes species that can grow both on mineral substrates and technogenically eutrophicated peat soils. The article provides characteristics of a number of transformed habitats that arose in the mire areas of the – Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra, within which rare and protected species were found. Among the plants whose distribution in the mires of the district is largely due to the expansion of human economic activity, mention should be made of *Thelypteris palustris*, *Lycopodiella inundata*, *Typha angustifolia*, liverwort *Heterogemma laxa*, etc.*

Key words: transformation of mires, peat soils, pollution, eutrophication, Red Book, refugia for rare plants.

ВВЕДЕНИЕ

На территории центра Западной Сибири проблема охраны редких и исчезающих видов растений приобрела в настоящее время особую актуальность в связи с экстенсивным развитием нефтедобывающей отрасли, приводящим к значительному росту площади земель с антропогенно измененным почвенно-растительным покровом, что представляет потенциальную угрозу биоразнообразию. В то же время благодаря масштабной эвтрофикации массивов олиготрофных болот, расположенных на территориях крупных, давно осваиваемых месторождений, появлению различного рода насыпей, обваловок создаются условия для расширения спектра поселяющихся растений, в том числе и редких, и их внедрения в изменяющиеся сообщества.

В ходе полевых работ, проведенных на территории округа в период 2003-2023 гг., были обнаружены новые местонахождения редких и требующих охраны видов растений, включенных в Красную книгу Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО-Югры) и ее приложение [Vasin, Vasina, 2013], а также в сводку «Редкие и исчезающие виды Сибири» [Redkie ..., 1980]. Уже на первом этапе исследований было выявлено появление значительной части новых местообитаний редких видов на участках антропогенно трансформированных болот в пределах действующих месторождений [Shvedchikova et al., 2012]. Однако накопление новых данных по рассматриваемой проблематике создает необходимость вновь проанализировать тенденции распределения редких видов с учетом пополнения списка за счет адвентивных видов, измененных экологических предпочтений растений местной флоры на фоне протекающей эвтрофикации болот и в целом увеличения масштабов нарушения заболоченных земель в пределах округа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования послужили ранее нарушенные в ходе обустройства и функционирования инфраструктуры нефтяных месторождений олиготрофные и мезотрофные биогеоценозы таежной зоны Западно-Сибирской низменности в границах ХМАО-Югры. Исследованиями были охвачены основные нефтедобывающие районы региона в правобережье и левобережье Оби, в подзонах северной и средней тайги, расположенные в районах Сургутской низины, Кондинской низменности, Северо-Сосьвинской возвышенности, Сибирских Увалов, Обь-Иртышского междуречья, в бассейне реки Вах. Полевые данные собирались как на постоянных участках мониторинга, так и в ходе маршрутных обследований. Выполнялись описания растительности, заложение разрезов и скважин для выявления типа почв исходного биоценоза. На ряде объектов были проведены средневременные наблюдения, охватывающие период до 15 лет, включающие отбор образцов торфяных почв (определялись pH, содержание нефти, хлоридов). Собирался гербарий сосудистых растений, мохообразных и лишайников. Аналитические исследования торфяных почв проводили в лабораториях Почвенного института им. В.В. Докучаева и факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Латинские названия сосудистых растений даны с некоторыми дополнениями по «Конспекту флоры Азиатской России» [Baykov, 2012], мхов и печеночников – по «An annotated checklist of bryophytes of Europe» [Hodgetts et al., 2020], лишайников по Index Fungorum.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По отношению к заселению участков нарушенных олиготрофных и олиго-мезотрофных торфяных почв можно выделить три типа стратегий расселения редких видов растений – поселение непосредственно на торфяном субстрате, сохранение только на минеральном субстрате технологических объектов, поселение на минеральном субстрате с последующим переходом на торфяной.

К подлежащим охране в пределах ХМАО-Югры в прошлое десятилетие видам растений, поселяющимся непосредственно на торфе, чей ареал обитания существенно расширился под влиянием техногенных факторов, можно отнести *Thelypteris palustris*. Этот папоротник многократно был отмечен на территории месторождений Вахской низменности. В естественных условиях он приурочен к мезо-эвтрофным болотам (Рис. 1). Его успешное распространение связано с подтоплением, а также увеличением трофности торфяных почв олиготрофных и олиго-мезотрофных болот. Находки вида прежде всего приурочены к эвтрофицированным обводненным местообитаниям – подтопленным сегментам, примыкающим к обваловкам нефтешламовых амбаров, берегам канав и зарастающих траншей, перехватывающих сток от техногенных объектов (Рис. 2, 3).

Нередок *T. palustris* на рекультивированных участках, ранее загрязненных солевыми растворами. Восстановление почвенно-растительного покрова подобных торфяников отличает последовательная смена растительности, сопровождающая процесс рассоления почв, однако средневременные наблюдения при этом демонстрируют сохраняющееся остаточное содержание солей. Так, немногочисленные экземпляры *T. palustris* в 2019 г. были обнаружены на рекультивированном сосново-кустарничково-сфагновом болоте (ряме) с умеренным засолением, характеризовавшимся на тот момент содержанием хлоридов в почве от 8 до 10 г/кг (Рис. 4). В 2003-

2006 г. в этом месте после проведенной рекультивации содержание хлоридов составляло 5-6 г/кг, произрастали *Puccinellia hauptiana*, *Chenopodium rubrum*, на микроповышениях были отмечены отдельные мелкие латки *Pohlia nutans*. В сформировавшемся к 2019 г. сообществе преобладали виды, характерные для ранее антропогенно засоленных участков дренированных болот – *Calamagrostis epigeios*, *Epilobium palustre*, *Juncus bufonius*, *J. alpinoarticulatus*, *Phragmites australis*, *Rumex aquaticus*. Небольшую примесь составляли относительно солеустойчивые растения олиготрофных болот *Eriophorum russeolum*, *Oxycoccus palustris*. Моховой покров (с общим проективным покрытием 25%) образовали главным образом *Pohlia nutans* с участием *Aulacomnium palustre*, *Ceratodon purpureus*, *Dicranum polysetum*, *Leptobryum pyriforme*, *Polytrichum strictum*, *Sphagnum squarrosum*, *S. fimbriatum*, *S. riparium*, *Warnstorfia fluitans*, печеночников.

T. palustris также был обнаружен на участках со смешанным нефте-солевым загрязнением. Например, в мочажине рекультивированного в 2004 г. грядово-мочажинного комплексного болота, где содержание нефтепродуктов в 2006 г. в верхнем корнеобитаемом слое (здесь и далее идет речь о слое 0-20 см) составляло 148 г/кг, хлоридов – 3 г/кг, в 2019 г., соответственно, 123 г/кг и 0,7 г/кг. В 2006 г. в этой части болота росли немногочисленные экземпляры *Eriophorum vaginatum*, *E. russeolum*, *E. angustifolium*, *Typha latifolia*, *Phleum pratense*, *Tephroseris palustris*, спустя 13 лет доминировала *Eriophorum angustifolium*, к ней примешивались *Calamagrostis langsdorffii*, *Carex rostrata*, *Epilobium palustre*, *Phragmites australis*, *Rumex aquaticus*, *Schoenoplectus lacustris*. Популяция *T. palustris* с немногочисленными экземплярами была приурочена к периферии участка, тяготеющей к придорожной, более обводненной его части. В целом выявленные на рекультивированных торфяниках популяции *T. palustris* в настоящее время сравнительно невелики и насчитывают от единичных особей до нескольких десятков.



Рисунок 1. *Thelypteris palustris* в нативных условиях предпочитает мезо-эвтрофные местообитания.



Рисунок 2. Расселение *Thelypteris palustris* (показано красной стрелкой) вдоль канавки, перехватывающей сток от кустового основания.



Рисунок 3. *Thelypteris palustris* на берегу обводненной траншеи.



Рисунок 4. *Thelypteris palustris* на искусственно созданной микрогряде рекультивированного засоленного мелкопочажинного комплексного болота.

Одной из интересных черт восстановительных процессов мохового/мохово-лишайникового яруса, происходящих на рекультивированных поверхностях зарастающих торфяников (главным образом, рямов и гряд комплексных болот, не подверженных антропогенному подтоплению), является активное поселение печеночников, не испытывающих в этом случае сколько-нибудь значительной конкуренции со стороны сфагновых мхов. В их числе неоднократно отмечен *Heterogemma laxa*. Этот вид был собран нами в 2019 г. на четырех рекультивированных в 2003-2005 гг. участках Саянского месторождения, характеризующихся как солевым, так и смешанным нефте-солевым загрязнением (Рис. 5, 6).

Зарастание олиготрофных торфяников с сильным засолением представляет собой одну из серьезных проблем, с которой сталкиваются специалисты, занимающиеся рекультивацией подобных земель. Согласно регламенту, эти болота проходят все стадии технической и биологической рекультивации, в том числе и этап фрезерования загрязненной почвы. Долгое время подобные участки могут быть лишены растительности, так как виды, характерные для олиготрофных болот, здесь не поселяются, высокое засоление также служит препятствием для развития трав, обычно высеваемых при восстановительных мероприятиях. Со временем при возможности заноса инвазивных растений происходит подселение специфического набора видов сосудистых трав, в первую очередь галотолерантных и галофитов, мохообразные начинают появляться на наиболее высоких дренированных микроповышениях по мере рассоления самого верхнего слоя почвы. Обычно пионерами выступают зеленые мхи, спустя 5-6 лет здесь же могут появиться первые пятна сфагновых мхов. Видимо, на стадии, когда сомкнутый покров из других растений еще не успевает сформироваться, здесь подселяются и печеночники. На обследованных участках в составе мохового покрова к *H. laxa* примешиваются такие их виды, как *Cephalozia bicuspidata*, *Cephaloziella elachista*, *Riccardia latifrons*, *Calypogeia muelleriana*, *Mylia anomala*.

Важно отметить, что почвы на торфяниках этого типа долгое время сохраняют остаточное засоление, которое не препятствует поселению и росту печеночников. Так, на одном из участков, где был впоследствии собран *H. laxa*, в 2003-2009 гг. были отмечены высокие концентрации хлоридов в верхнем слое почв (23 г/кг), на трех других участках содержание хлоридов было заметно меньшим и варьировало от 3 до 6 г/кг. К 2019 г. засоление снизилось до умеренных значений – максимально выявленное содержание хлоридов в местах сбора *H. laxa* составляло до 9 г/кг, при этом содержание нефтепродуктов – 3-17 г/кг, что соответствовало низкому уровню загрязнения нефтью. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что на участках со смешанным нефте-солевым загрязнением или преобладающим нефтяным загрязнением печеночники избегают сегментов с высокими остаточными концентрациями нефти, предпочитая селиться в местах (в частности, на периферии разливов), где нефть на поверхности не образует гидрофобную корку, которая формируется по мере ее поднятия и затвердевания на поверхности рекультивированных торфяных болот [Турун, 2018]. При этом срезка корки, по нашим наблюдениям, создает условия для более быстрого развития мохового покрова и в том числе печеночников [Shishkonakova et al., 2024].



Рисунок 5. Рекультивированные участки, где был собран *Heterogemma laxa*, грядово-мелкомочажинное болото со смешанным нефте-солевым загрязнением.



Рисунок 6. Рекультивированные участки, где был собран *Heterogemma laxa*, техногенно засоленное сосново-кустарничково-сфагновое болото.

К видам, произрастающим на техногенно нарушенных участках болот, но не получившим широкого распространения, относятся *Trichophorum alpinum* и *Hammarbya paludosa*.

Обнаруженные нами два местообитания *T. alpinum* [Shvedchikova et al., 2013] также были приурочены к эвтрофицированным олиготрофным торфяным почвам. На повышение их трофности указывает вселение нехарактерных растений и увеличение размеров ранее произраставших олиготрофных видов. В первом случае *T. alpinum* разросся в мочажине комплексного грядово-среднемочажинного болота, заросшей преимущественно *Carex limosa*, *Rhynchospora alba*, *Oxycoccus palustris*, а также немногочисленным подростом березы. На отдельных микроповышениях сохранились кочки *Trichophorum cespitosum*, отличающиеся значительной высотой (до 50 см) по сравнению с кочками, произрастающими в нативных условиях. Во втором случае эвтрофицированный рям активно зарастал березой и ивами, в травяном ярусе доминировали вейники и пушицы (Рис. 7).



Рисунок 7. *Trichophorum alpinum* на антропогенно эвтрофицированном сосново-кустарничково-сфагновом болоте.



Рисунок 8. *Hammarbya paludosa* на ранее нефтезагрязненном рекультивированном сосново-кустарничково-сфагновом болоте.

Hammarbya paludosa была обнаружена как на ранее рекультивированных болотах, подвергшихся фрезерованию, так и на участке, где произошло самовосстановление растительности после разлива нефти, с почвенным покровом, не испытывавшим турбации (Рис. 8). Типичными местообитаниями для этого вида являются слабо загрязненные нефтью и солями участки рямов, близкие к нормативным показателям по ПДК – наименее загрязненные микроповышения и периферии рекультивированных выделов. Почвы, на которых произрастали экземпляры *H. paludosa*, характеризовались содержанием нефтепродуктов в слое 0-20 см от 13,8 до 36 г/кг, хлоридов – от 0,08 до 2,18 г/кг, pH 4,9 до 5,3. По имеющимся в литературе данным [Zhmylev et al., 2021], *H. paludosa* в нативных условиях поселяется в местообитаниях с широким диапазоном pH (от 4,5 до 7,5), поэтому эвтрофикация олиготрофных торфяных почв для нее не является ограничивающим фактором, а может способствовать расширению спектра занимаемых местообитаний. В то же время ее сравнительно нередкое поселение на рекультивированных болотах прежде всего обусловлено образованием прогалов в напочвенном покрове при различного рода нарушениях и снижением конкуренции на этапе первичного заселения рекультивированных участков.

Часть видов, включенных в Красную книгу ХМАО-Югры и отмеченных в границах трансформированных массивов торфяных болот, предпочитает селиться на техногенных объектах, отсыпанных минеральным субстратом. Обнаруженные ценопопуляции *Epipactis palustris*, насчитывавшие от единичных экземпляров до несколько десятков особей, в течение ряда лет встречались по обочинам внутрипромысловых дорог в разных частях Самотлорского месторождения (Рис. 9). Согласно Т. И. Варлыгиной [Varlygina, 2022], в областях Центральной России *E. palustris* показал себя довольно устойчивым к нарушениям видом, который, несмотря на масштабную мелиорацию болот, смог сохраниться в подавляющем большинстве регионов произрастания. На рекультивированной насыпи разведочной скважины Ватлорского месторождения в 2013 г. был обнаружен *Psilopilum cavifolium*. В 2016 г. на рекультивированном амбаре Тевлинско-Русскинского месторождения на влажном супесчаном грунте в большом обилии была найдена *Lycopodiella inundata* (Рис. 10). Наши находки этого вида в нативных условиях были сделаны на днище обсыхающего хасырея [Shvedchikova et al., 2013]. В настоящее время *L. inundata* переводится в приложение к Красной книге округа. Одним из оснований послужило в том числе и то обстоятельство, что в большинстве местонахождений, отмеченных за последние годы на территории ХМАО-Югры, *L. inundata* тяготеет именно к антропогенно нарушенным местообитаниям [Glazunov, 2023].



Рисунок 9. Популяция *Epipactis palustris* на обочине внутрипромысловой дороги.



Рисунок 10. *Lycopodiella inundata* на рекультивированной поверхности амбара.

Отдельные охраняемые растения поселяются как на минеральных, так и на техногенно засоленных торфяных субстратах. На обочинах дорог ряда месторождений Нижневартовского и Нефтеюганского районов ХМАО-Югры в разные годы были выявлены местонахождения видов из рода *Triglochin* (Рис. 11). Обнаруженные ранее популяции триостренников, произрастающих на ненарушенных болотах, расположены в восточной части округа [Vasin, Vasina, 2013], где *Triglochin maritima* был отмечен на низинных болотах богатого грунтового питания долин рек и логов, а *T. palustre* – на болотах переходного типа [Lapshina et al., 2018]. Во «Флоре Западной Сибири» [Krylov, 1955], во многом отражающей экологию и распространение видов до этапа активного хозяйственного освоения центральной части данного региона, местонахождения триостренников были приурочены к его югу, биотопически *T. palustre* тяготел к болотам, сырым лугам, берегам водотоков, *T. maritima* – к сырым солончакам и солонцеватым местам, реже к торфяным болотам. Наблюдения последних лет показали, что триостренники в ряде случаев могут переходить на прилегающие к дорогам участки болот с засоленными торфяными почвами и удерживаться там, тем самым демонстрируя свой инвазионный потенциал. Примечательно, что в трансформированных болотных местообитаниях, в которые они проникают, высокий уровень хлоридного засоления сохраняется в течение продолжительного времени. Так, участки, где было отмечено поселение триостренников, отличались высоким содержанием хлоридов в торфяных почвах за весь 15-летний период наблюдений – в слое 0-20 см этот показатель варьировал от 21 до 228 г/кг, при этом pH составлял от 5,5 до 6,2.

К специфическим биотопам, заселяемым триостренниками, относятся окраины солезагрязненных мочажин комплексных болот. В их центральных, наиболее обводненных частях растительность отсутствует, что может быть обусловлено не только повышенным содержанием поллютантов, но и токсическим действием галогенорганических соединений, а также образованием

последних в ходе взаимодействия галогенов с органическим веществом торфа [Vodyanitskiy et al., 2020]. Кроме видов рода *Triglochin*, периферические части мочажин могут зарастать *Phragmites australis*, *Calamagrostis epigeios*, иногда отмечаются вкрапления *Typha latifolia* (Рис. 12). Однако в таких условиях даже галотолерантные виды испытывают угнетение, что проявляется нередко в более мелких размерах, проявлениях хлороза и некроза.

Интересно, что оба вида рода *Triglochin* являются индикаторами высокой степени техногенного засоления и в других регионах бореальной зоны. Например, на территориях предприятий по производству калийных удобрений в Пермском крае они входят в состав специфических группировок растительности, по которым выявляется засоление, обусловленное галитовыми отходами [Shishkonakova, 2017].



Рисунок 11. *Triglochin maritima* на обочине внутрипромысловой дороги Самотлорского месторождения.



Рисунок 12. *Triglochin palustre* в мочажине болота с хлоридным засолением почв (Самотлорское месторождение).

Примером вида, поселяющегося как на минеральных, так и на торфяных почвах, может служить *Malaxis monophyllos*. Нами в разные годы *M. monophyllos* обнаруживался в пределах олиготрофных и мезотрофных болотных массивов – на отвалах грунта, обочинах дорог, на участках с антропогенно эвтрофицированными торфяными почвами. Способность *M. monophyllos* к созданию вторичных популяций на незадернованных субстратах техногенных местообитаний, обусловленная низкой конкуренцией со стороны других видов растений, отмечалась и другими исследователями [Filimonova et al., 2018; Kirillova, Kirillov, 2021].

На эвтрофицированных участках олиготрофных болот ряда месторождений часто произрастают виды рода *Dactylorhiza*, при том что периодически пальчатокоренники присутствуют и на минеральных грунтах, в частности, они нередки на обочинах и бермах дорог. Более распространенные из них – *Dactylorhiza maculata* subsp. *fuchsii*, *D. maculata* subsp. *hebridensis*. Поселение пальчатокоренников на нарушенных местообитаниях отмечают и другие авторы [Vasilevskaya et al., 2007; Shepeleva, Luk'yanenko, 2009; Bushueva et al., 2022]. Т.И. Варлыгина [Varlygina, 2022] на примере регионов Средней России показала, что большинство видов рода *Dactylorhiza*, несмотря на высокую освоенность отдельных территорий, сохранили свои ареалы, а некоторые виды этого рода смогли их расширить.

К видам, вошедшим в сводку «Редкие и исчезающие растения Сибири» [Redkie ..., 1980], относится *Typha angustifolia*. Распространению *T. angustifolia* способствует солевое загрязнение болот на территории нефтяных месторождений, которое образует специфический геохимический фон, соответствующий экологическим требованиям этого рогоза. Он неоднократно встречался в залитых водой выемках грунта, на засоленных эвтрофицированных участках олиготрофных болот, в придорожных канавах и в нефтешламowych амбарах. Примечательно, что данный вид рогоза заселяет более глубокие участки мочажин в сравнении с *Typha latifolia* (Рис. 13).



Рисунки 13. *Typha angustifolia* на антропогенно трансформированном болоте (показан красными стрелками).

Кроме сосудистых растений и мохообразных, в 2016 г. в ходе работ по обследованию нефтешламовых амбаров на одном из них, расположенном на Ловинском месторождении, был обнаружен включенный в региональную Красную книгу лишайник *Bryoria capillaris*. Амбар располагался во внутриболотной ложбине стока на левобережье р. Мулымья, в ее среднем течении. Лишайник был собран на сосне, выросшей на обваловке амбара, обустроенного, по имеющимся сведениям, в конце 1980-х годов. Можно предположить, что формирование на рекультивированных амбарах и насыпях различного рода насаждений из ранее нехарактерных для олиготрофных и мезотрофных болот видов деревьев может способствовать расширению спектра поселяющихся лишайников, в том числе и редких.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным фактором распространения многих редких видов на нарушенных территориях крупных месторождений ХМАО-Югры служит масштабная эвтрофикация, охватившая в настоящее время значительные площади олиготрофных болот.

Возникшие под техногенным влиянием вторичные болотные биогеоценозы могут выполнять функцию рефугиумов для редких и охраняемых растений, чьи местообитания сокращаются по причинам как антропогенного, так и естественно-исторического характера, а учет биоразнообразия таких видов может играть индикаторную роль при определении природоохранного статуса территорий месторождений. Так, в существующей концепции адаптивного менеджмента восстановления болотных экосистем предлагается найти пути сохранения местообитаний редких и охраняемых видов, поселившихся в ходе антропогенных трансформаций на болотах Европы [Remm et al., 2019].

Одним из путей выявления рефугиумов редких видов на нарушенных территориях месторождений, где они обычно систематически не изучаются, является их инвентаризация и картирование. Накопление полученных в результате подобных исследований материалов позволит получить более широкую информационную базу по редким видам округа и на этой основе скорректировать их природоохранный статус с последующей разработкой предложений по их охране. Однако уже на современном этапе можно говорить о том, что для ряда редких видов, ранее включенных в основной список Красной книги ХМАО-Югры, антропогенное воздействие создало предпосылки для значительного расширения спектра местообитаний и понижения природоохранного статуса. К таким растениям относятся *Thelypteris palustris* и *Lycopodiella inundata*. Возможно, что по мере накопления наших знаний об охраняемых видах, произрастающих на нарушенных субстратах, корректировке подвергнутся статусы редкости и других растений, упоминаемых в данной статье. В

то же время выявленным на нарушенных субстратах рефугиумам особо ценных и редких видов растений необходимо придавать статус резерватов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность старшему научному сотруднику Гербария МГУ им. М.В. Ломоносова Игнатовой Е.А. и ведущему сотруднику Главного ботанического сада им. Н.В. Цицина Мамонтову Ю.С. за помощь в определении мхов и печеночников.

ЛИТЕРАТУРА

- Baykov K.S. (ed.). 2012. Abstract of flora of Asian Russia: vascular plants. Izd-vo SO RAN, Novosibirsk 640, pp. (in Russian). [Байков К.С. (ред.). 2012. Конспект флоры Азиатской России: Сосудистые растения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 640 с.].
- Bushueva Yu.O., Gudovskikh Yu.V., Egoshina T.L., Luginina E.A., Sorokina A.A., Yaroslavtsev A.V. 2022. *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó in technogenic habitats of the northern taiga. In: *Protection and cultivation of orchids. Materials of the XII International Scientific Conference*, pp. 40-47, Moscow (in Russian). [Бушуева Ю.О., Гудовских Ю.В., Егошина Т.Л., Лугинина Е.А., Сорокина А.А., Ярославцев А.В. 2022. *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó в техногенных местообитаниях северной тайги // Охрана и культивирование орхидей. Материалы XII Международной научной конференции. М. С. 40-47].
- Filimonova E.I., Glazyrina M.A., Lukina N.V., Rakov E.A. 2018. *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. on industrial dumps of the Middle Ural and in natural habitats. *Proceeding of Petrozavodsk State university*, 8 (177): 93-100 (in Russian). [Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Лукина Н.В., Раков Е.А. 2018. *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. на промышленных отвалах Среднего Урала и в естественном местообитании // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 8 (177). С. 93-100].
- Glazunov V.A. 2023 Changes in the section Lycopodiophyta of the Red Book of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra during the preparation of a new edition. In: *Botany and botanists in a changing world. Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 135th anniversary of the Department of Botany and the 145th anniversary of Tomsk State University*, pp. 60-62, Tomsk (in Russian). [Глазунов В.А. 2023. Изменения в разделе Плауновидные (Lycopodiophyta) Красной книги Ханты-Мансийского автономного округа – Югры при подготовке нового издания // Ботаника и ботаники в меняющемся мире. Труды Международной научной конференции, посвященной 135-летию кафедры ботаники и 145-летию Томского государственного университета. Томск. С. 60-62].
- Hodgetts, N. G., L. Söderström, T. L. Blockeel, S. Caspari, M. S. Ignatov, N. A. Konstantinova, N. Lockhart, B. Papp, C. Schröck, M. Sim-Sim, D. Bell, N. E. Bell, H. H. Blom, M. A. Bruggeman-Nannenga, M. Brugués, J. Enroth, K. I. Flatberg, R. Garilleti, L. Hedenäs, D. T. Holyoak, V. Hugonnot, I. U. Kariyawasam, H. Köckinger, J. Kučera, F. Lara & R. D. Porley. 2020. An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus. *Journal of Bryology*, 42(1): 1–116.
- Kirillova I.A., Kirillov D.V. 2021. Seed productivity and biological features of *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) on the northern border of the area. *Theoretical and applied ecology*, 3: 133-139 (in Russian). [Кириллова И.А., Кириллов Д.В. 2021. Семенная продуктивность и особенности биологии *Malaxis monophyllos* (L.) Sw. (Orchidaceae) на северной границе ареала // Теоретическая и прикладная экология. № 3. С. 133-139].
- Krylov P.N. 1955. *Flora of Western Siberia*. Vol. 1. Tomskiy gos. un-t., Tomsk, 138 pp. (in Russian) [Крылов П.Н. 1955. Флора Западной Сибири. Т. 1. Томск: Томский гос. ун-т. 138 с.].
- Lapshina E.D., Ganasevich G.N., Vasina A.L. 2018. Rare plants and plant communities of rich fens of the "Malaya Sosva" Nature Reserve (Western Siberia). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 9 (1): 72-92 (in Russian). [Лапшина Е.Д., Ганасевич Г.Н., Васина А.Л. 2018. Редкие растения и растительные сообщества болот богатого грунтового питания заповедника «Малая Сосьва» (Западная Сибирь) // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 9. № 1. С. 72-92].
- Rare and endangered plants of Siberia*. 1980. Nauka, Novosibirsk, 224 pp. (in Russian). [Редкие и исчезающие растения Сибири. 1980. Новосибирск: Наука. 224 с.].
- Remm L., Lõhmus A., Leibak E., Kohv M., Salm J-O, Lõhmus P., Rosenväld R., Runnel K., Vellak K., Rannap R. 2019. Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and practical approach in Estonian mires. *Journal of Environmental Management*, 250: 109439.
- Shepeleva L.F., Luk'yanenko D.N. 2009. State of orchid populations in the area between the Bolshoy Salym and Irtysh rivers. *Tomsk State University Journal*, 326: 208-213 (in Russian). [Шепелева Л.Ф., Лукьяненко Д.Н. 2009. Состояние популяций орхидных на территории междуречья Большого Салыма и Иртыша // Вестник Томского государственного университета. № 326. С. 208-213].
- Shishkonakova E.A. 2017. Anthropogenic vegetation of the territories of enterprises of OJSC "Uralkali" (Perm region). *Environment and Human: Ecological Studies*, 3: 65-79 (in Russian). [Шишконова Е.А. 2017. Антропогенная растительность территорий предприятий ОАО «Уралкалий» (Пермская область) // Социально-экологические технологии. № 3. С. 65-79].
- Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Kinzhaev R.R., Arzamazova A.V., Rogova O.B., Mel'nik M.A. 2024. Features of the soil and vegetation cover of restored oil-contaminated areas of oligotrophic bogs in the Middle Ob region, reclaimed by the cutting method. *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil science*. 79 (2): 119-135 (in Russian). [Шишконова Е.А., Аветов Н.А., Кинзаев Р.Р., Арзамазова А.В., Рогова О.Б., Мельник М.А. 2024. Особенности почвенного и растительного покрова восстановленных нефтесеконструированных олиготрофических болот в Среднем Обском бассейне, reclaimed by the cutting method. *Московский университет. Серия 17. Почвоведение*. 79 (2): 119-135 (in Russian).]

Кинжаев Р.Р., Арзамазова А.В., Рогова О.Б., Мельник М.А. 2024. Особенности почвенно-растительного покрова восстанавливающихся нефтезагрязненных участков олиготрофных болот в Среднем Приобье, рекультивированных методом срезки // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. Т. 79. № 2. С. 119-135].

Shvedchikova N.K., Avetov N.A., Shishkonakova E.A. 2012. New locations of rare plants on the territory of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. *Turczaninowia*, 15 (1): 45-50 (in Russian). [Шведчикова Н.К., Аветов Н.А., Шишконокова Е.А. 2012. Новые местонахождения редких растений на территории ХМАО-Югры // *Turczaninowia*. Т. 15. № 1. С. 45-50].

Tyurin V.N. 2018. Anthropogenic dynamics of mire ecosystems under oil and salt pollution. In: *IX Galkin Readings. Conference materials*, pp. 215-218, Saint Petersburg (in Russian). [Тюрин В.Н. 2018. Антропогенная динамика болотных экосистем при нефтяном и солевом загрязнении // IX Галкинские чтения. Мат-лы конф. СПб. С. 215-218].

Varlygina T.I. 2022. The state of protection of orchids (Orchidaceae) of Central Russia. In: *Protection and cultivation of orchids. Materials of the XII International Scientific Conference*, pp. 48-53, Moscow (in Russian). [Варлыгина Т. И. 2022. Состояние охраны орхидных (Orchidaceae) Средней России // Охрана и культивирование орхидей. Материалы XII Международной научной конференции. М. С. 48-53.]

Vasilevskaya N.V., Glazunova E.D., Putilova N.V. 2007. State of coenopopulations of *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó in disturbed habitats in the Arctic. In: *Current problems of geobotany. Materials of the III All-Russian school-conference*, part. 1, pp. 97-101, Izdatel'stvo KarNTs RAN, Petrozavodsk (in Russian). [Василевская Н. В., Глазунова Е. Д., Путилова Н. В. 2007. Состояние ценопопуляций *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó на нарушенных местообитаниях в условиях Арктики // Актуальные проблемы геоботаники. Материалы III Всерос. школы-конференции. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН. Ч. 1. С. 97-101].

Vasin A.M., Vasina A.L. (eds). 2013. *Red Book of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra: animals, plants, mushrooms*. Basko, Ekaterinburg, 460 pp. (in Russian). [Красная книга Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: животные, растения, грибы. 2013. / отв. ред. А.М. Васин, А.Л. Васина. Екатеринбург: Баско. 460 с.].

Vodyanitskiy Yu.N., Avetov N.A., Savichev A.T., Trofimov S.Ya., Shishkonakova E.A. 2020. Laboratory determination of the composition of the solid phase of technogenically saline peatland: possibilities and limitations. *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil science*, 3: 39-46 (in Russian). [Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконокова Е.А. 2020. Лабораторное определение состава твердой фазы техногенно засоленного торфяника: возможности и ограничения // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. № 3. С. 39-46].

Zhmylev P.Yu., Tatarenko I.V., Voronina E.Yu., Dmitriev G.V., Khrapunova E.M. 2021. *Hammarbya paludosa* (L.) Kuntze: so many questions. *Herald of Tver university. Series: Biology and Ecology*, 2 (62): 56-73 (in Russian). [Жмылев П.Ю., Татаренко И.В., Воронина Е.Ю., Дмитриев Г.В., Храпунова Е.М. 2021. *Hammarbya paludosa* (L.) Kuntze: так много вопросов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. № 2 (62). С. 56-73].

Поступила в редакцию: 05.08.2024
Переработанный вариант: 01.09.2024

MULTY-YEAR DYNAMICS OF SOME PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS IN MIRE WATER AT THE SITE OF SALT POLLUTION OF THE RAISED BOG (VOSTOCHNO-SURGUTSKOYE OIL FIELD, WESTERN SIBERIA)

Tyurin V.N. , Kharbaka V.A., Maslovskaya O.V.*

Сургутский государственный университет

*tyurin_vn@mail.ru

Citation: Tyurin V.N., Kharbaka V.A., Maslovskaya O.V. 2024. Multy-year dynamics of some physico-chemical parameters in mire water at the site of salt pollution of the raised bog (Vostochno-Surgutskoye oil field, Western Siberia). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(2): 105-111.

DOI: 10.18822/edgcc636713

В работе рассматриваются особенности изменения некоторых физико-химических параметров болотных вод верхового болота (рН, электропроводность, концентрация хлоридов) за многолетний период.

Ключевые слова: верховое болото, болотные воды, подтоварные воды, солевое загрязнение, физико-химические параметры, рН, электропроводность, хлориды.

The article discusses the features of changes in some physico-chemical parameters of mire waters in raised bog (pH, electrical conductivity, chloride concentration) over a long period.

Keywords: raised bog, mire waters, produced waters, salt pollution, physico-chemical parameters, pH, electrical conductivity, chlorides.

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное засоление в Западной Сибири является одной из основных экологических проблем на нефтяных месторождениях из-за широкого распространения солевых загрязнений и их негативного влияния на природные экосистемы. Наименее устойчивыми к воздействию являются верховые болота вследствие уязвимости олиготрофной растительности к засолению и способности торфа накапливать загрязнители.

На сегодняшний день проблема загрязнения болотных экосистем в регионе остается недостаточно изученной и изложена пока в относительно небольшом числе работ [Soromotin et al., 1996; Lapshina, Bloyten, 1999; Avetov, Shishkonakova, 2010; Vodyanitskiy et al., 2013; Voistinova, Kharanzhevskaya, 2013; Voistinova, Kharanzhevskaya, 2014, etc.], а вопросы, связанные с мониторингом болот при загрязнении на нефтяных месторождениях, представлены в единичных публикациях [Yermolov et al., 2011; Tyurin, 2018; Tyurin, Kukurichkin, 2020; Tyurin, Domakhina, 2023, etc.]. Результаты исследований и наблюдений за состоянием экосистем отражают существенные изменения физико-химических параметров почв и болотных вод (происходит эвтрофикация болот, повышение минерализации, смещение рН к нейтральным значениям). Характерно изменение ионного состава болотных вод (наиболее заметно увеличение массовой доли ионов натрия и хлора). Солевое загрязнение обуславливает кардинальную перестройку биотического компонента экосистем: на место олиготрофных растений приходят мезотрофы и эвтрофы. Наиболее показательным при изменении болотной растительности является появление и зачастую доминирование совершенно нетипичных для болот видов: злаки (вейник наземный – *Calamagrostis epigeios*, бескильница – *Puccinellia* sp.), представители лугового разнотравья, деревья и кустарники из лесных экосистем (береза повислая – *Betula pendula*, осина – *Populus tremula*, ива козья – *Salix caprea* и др.).

В данной работе даются некоторые результаты многолетних наблюдений за состоянием верхового болота на Восточно-Сургутском месторождении нефти, позволяющие частично заполнить пробел в исследовании восстановительной динамики экосистем после солевого загрязнения. Основной упор сделан на физико-химических параметрах (рН, электропроводность, концентрация хлоридов) и их изменении во времени. В дальнейшем предполагается для исследуемого участка обнародовать сведения о состоянии растительного покрова и особенностях его изменения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Болотный массив, подвергнутый в 2005 г. загрязнению (Рис. 1) на площади около 80 га (участок 1), находится в 15 км северо-восточнее Сургута (Рис. 2). Это один из 4 участков мониторинга в пределах Восточно-Сургутского месторождения нефти.



Рисунок 1. Солевое загрязнение на исследуемом верховом болоте (участок 1). Фото В.Н. Тюрина от 16.07.2005.

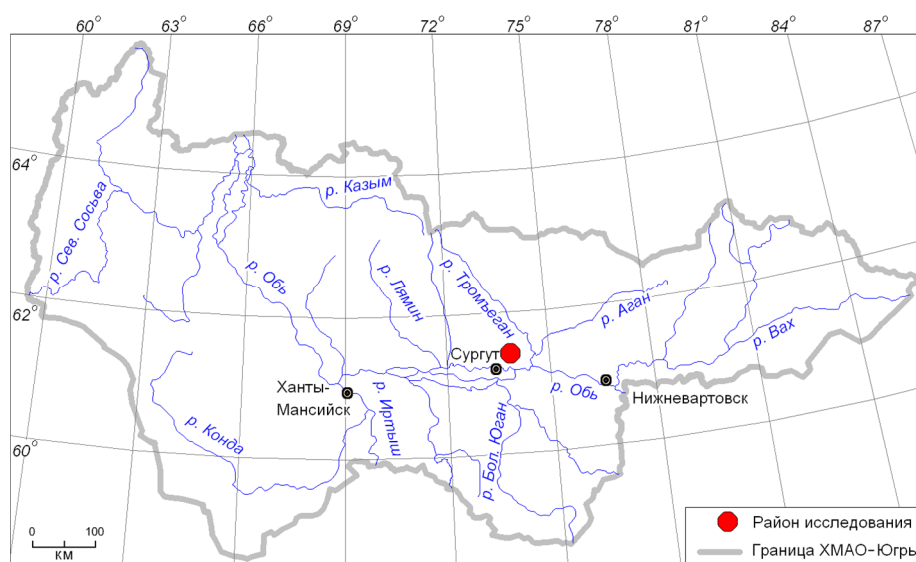


Рисунок 2. Картограмма района исследования.

В 2007 г. в контуре загрязнения были заложены две пробные площадки (ПП) – ПП 1 и ПП 2 для наблюдения за состоянием болотных экосистем. В 2010 г. исследования расширены за счет ПП 6Ф, 7, 8, 13, 14, 15. Позднее ПП 13 и ПП 14 были ликвидированы при строительстве карьера (Рис. 3).

В 2015 г. к западу от коридора трубопроводов дополнительно заложены ПП 21 и ПП 22 в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе. Эти площадки в 2005 г. находились на периферии загрязнения, и исходная растительность на них в основном сохранилась. Повреждения растительного покрова на них вследствие повторного загрязнения (2014 г.) зафиксированы в 2015 г. На данном участке болотные воды застаиваются из-за перекрытия стока трубопроводами, и по этой причине вымывание загрязнителя затруднено. Иные площадки расположены на месте кустарничково-сфагнового фитоценоза вниз по склону – к востоку от коридора трубопроводов (табл. 1).

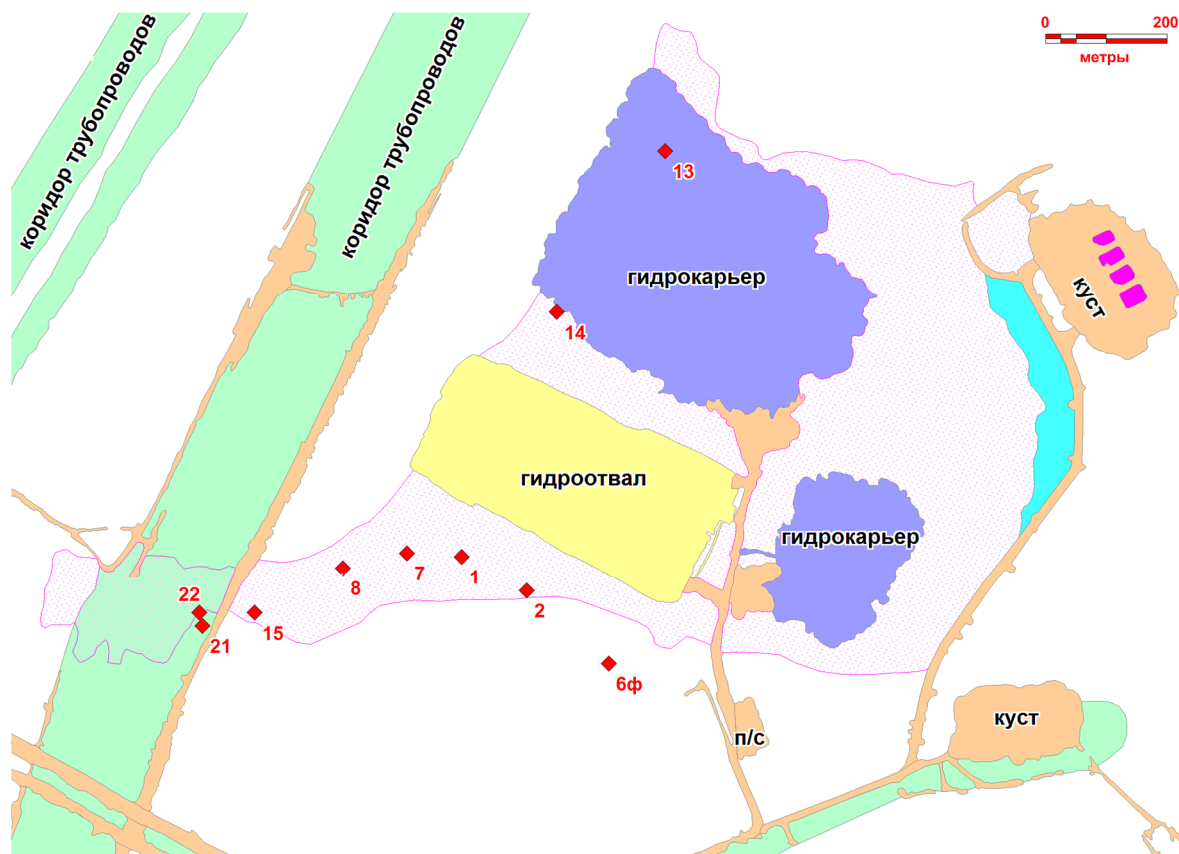


Рисунок 3. Положение пробных площадок на исследуемом участке (сиреневый контур – загрязнение 2005 г.). Картографический материал подготовлен В.Н. Тюриным и А.Н. Ломпас с участием О.А. Воробьевой.

Таблица 1. Общая характеристика пробных площадок (ПП)

ПП №	ПП 22	ПП 21	ПП 15	ПП 8	ПП 7	ПП 1	ПП 2	ПП 6Ф
Широта	61.3811	61.3809	61.3811	61.3817	61.3819	61.3819	61.3814	61.3803
Долгота	73.7060	73.7061	73.7077	73.7104	73.7124	73.7141	73.7161	73.7186
Размеры ПП, м	12.5×8	12.5×8	10×10	10×10	12.5×8	10×10	10×10	10×10
Год закладки ПП	2015	2015	2010	2010	2010	2007	2007	2010
Исходное сообщество	С-кч-сф	С-кч-сф	кч-сф	кч-сф	кч-сф	кч-сф	кч-сф	кч-сф
Расстояние от места аварии, м	50	50	50	180	290	380	480	630

Примечание: координаты (широта и долгота) даны в градусах WGS-84.

Сокращения: С-кч-сф – Сосново-кустарничково-сфагновое, кч-сф – кустарничково-сфагновое, Ф – фоновая (ПП 6Ф).

На площадках замеры параметров (рН, электропроводность, уровень болотных вод) и отбор проб болотных вод и почв проводились в 2007, 2010, 2014-2019 и 2023 гг., на ПП 21 и 22 – с 2015 по 2023 г. Измерения электропроводности выполнены с помощью полевых кондуктометров (преимущественно HM Digital AquaPro и HM Digital COM-100), измерения водородного показателя – портативными рН-метрами (в основном Hanna Checker 1, HM Digital PH 200). В отдельные годы также выполнялись описания растительных сообществ. Пробы почв и болотных вод в основном отбирались из прикопок на уровне мохового очеса (10-20 см). Работы выполнялись с июля по сентябрь (начало октября).

В лабораториях СурГУ определялись концентрация хлоридов (аргентометрическим методом), выборочно ионный состав болотных вод (с помощью капиллярного электрофореза), влажность почв, их зольность, некоторые другие показатели. В данной статье основное внимание уделено хлоридам – ведущему индикатору солевого загрязнения, а также связи показателя с электропроводностью и pH.

Тесная взаимосвязь концентрации хлоридов и электропроводности позволила оценить возможность вычисления показателя проводимости по содержанию ионов хлора, а также ориентировочно рассчитывать концентрацию хлоридов по величине электропроводности. В основу расчетов был взят массив данных для исследуемого участка из 42 парных измерений за 2015-2023 гг. (формула расчета концентрации хлоридов по электропроводности $y=0.4523x-21.064$, электропроводности по хлоридам – $y=1.9386x+56.977$, при величине достоверности аппроксимации 0.88). Использование расчетов потребовалось для определения недостающих значений (см. пояснения к табл. 2 и 3).

Таблица 2. Электропроводность на пробных площадках по годам, мкСм/см

Год	ПП 6Ф	ПП 2	ПП 1	ПП 7	ПП 8	ПП 15	ПП 21	ПП 22	Среднее	
									З	И
2007	н/д	595	645	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	620±25	н/д
2010*	н/д	80	99	89	89	104	н/д	н/д	92±4	н/д
2014*	н/д	100	100	150	164	210	н/д	н/д	145±21	н/д
2015	84	143	177	159	279	398	358	489	231±48	424±66
2016	68	198	195	181	178	214	180	190	193±6	185±5
2017	64	100	95	96	91	113	149	133	99±4	141±8
2018	74	139	133	133	131	129	172	119	133±2	145±27
2019	64	64	62	61	58	59	117	108	61±1	112±5
2023	82	171	166	175	190	249	274	222	190±15	248±26

Сокращения (здесь и в табл. 3 и 4): Ф – фоновая (ПП 6Ф), З – загрязненные на месте выноса загрязнителя в сторону понижения (ПП 2, 1, 7, 8, 15), И – у источника загрязнения (ПП 21, 22), н/д (здесь и в табл. 4 и 5) – нет данных.

Примечание: * в 2010 и 2014 гг. замеры электропроводности не проводились; расчет выполнен по отношению к концентрации хлоридов в соответствии с полученными данными на обследуемом участке за 2015–2023 гг.

Таблица 3. Концентрация хлоридов на пробных площадках по годам, мг/л

Год	ПП 6Ф	ПП 2	ПП 1	ПП 7	ПП 8	ПП 15	ПП 21	ПП 22	Среднее	
									З	И
2007	н/д	257*	280*	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	268±12	н/д
2010	7	12	22	17	16	24	н/д	н/д	18±2	н/д
2014	7	22	22	48	55	79	н/д	н/д	45±11	н/д
2015	20	29	47	52	59	89	146*	207*	55±10	176±31
2016	18	78	75	78	72	87	70	75	78±3	73±3
2017	16	25	23	23	22	28	35	34	24±1	35±1
2018	5	38	37	37	33	31	30	31	35±1	31±1
2019	10	12	12	13	10	13	21	22	12±1	22±1
2023	7	44	47	48	50	111	64	64	60±13	64±0

Примечание: * концентрация хлоридов определена по электропроводности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сбор сведений на участке организован только на третий год после загрязнения. По этой причине не удалось оценить физико-химические свойства почв и болотных вод в момент аварии. Однако характер поражения растительности (ее полное уничтожение) указывает на загрязнение, при котором концентрация ионов хлора (основного компонента пластовых вод [Kontorovich et al., 1975]) может превышать фоновые значения на 3 порядка. Максимальная концентрация хлоридов, зафиксированная нами при исследовании участков солевого загрязнения на Восточно-Сургутском месторождении, составила 4 г/л, при фоновых концентрациях в болотных водах в 5–10 мг/л [Savichev, 2015]. В открытых водных объектах содержание ионов хлора также обычно не превышает 10 мг/л [Ivanova, Novikova, 1976; Moskovchenko, 2003; Shornikova, 2009].

Замеры электропроводности спустя два года после аварии (2007 г.) для ПП 2 и ПП 1 показали сохранение высоких ее значений – 595 и 645 мкСм/см (Табл. 2); концентрация хлоридов при этом может превышать 250 мг/л. Через три года после аварии обычно содержание хлоридов уменьшается в 2-4 раза [Tyurin, Kukurichkin, 2020]. Таким образом, концентрация ионов хлора в момент аварии на участке (2005 г.) может быть оценена не менее чем 1 г/л, а электропроводность должна была превышать от 2000 мкСм/см.

В 2010 г. электропроводность приблизилась к фоновым значениям, не превышающим 100 мкСм/см. По концентрации хлоридов отмечалось 2-3-кратное превышение над фоном (Табл. 3). При таких значениях влияние на растительный покров практически отсутствует. Тем не менее возвращение растительности к исходному состоянию не наблюдается и сохраняется преобладание мезотрофных и эвтрофных видов вместо олиготрофов, характерных для начального состояния экосистемы. Изменение видового состава растений указывает на изменение экологических условий, которое, в частности, проявляется в повышении pH в среднем с 4.2 до 5.5 единицы (Табл. 4).

Таблица 4. Значения pH на пробных площадках по годам

Год	ПП 6Ф	ПП 2	ПП 1	ПП 7	ПП 8	ПП 15	ПП 21	ПП 22	Среднее	
									З	И
2010	н/д	6.3	6.5	6.3	6.2	7.0	н/д	н/д	6.5±0.1	н/д
2014	4.4	5.9	6.3	5.9	6.1	6.3	н/д	н/д	6.1±0.1	н/д
2015	4.2	5.5	5.7	5.6	5.4	5.6	6.2	6.2	5.6±0.1	6.2±0.0
2016	4.2	5.2	5.7	5.4	5.4	5.6	5.2	5.4	5.5±0.1	5.3±0.1
2017	4.1	5.0	5.3	5.4	5.6	5.5	5.2	5.6	5.4±0.1	5.4±0.2
2018	4.3	5.3	5.3	5.3	5.2	5.6	5.2	5.4	5.3±0.1	5.3±0.1
2019	4.4	5.6	5.7	5.7	5.7	5.5	5.5	5.9	5.6±0.0	5.7±0.2
2023	4.2	4.9	5.0	5.2	5.2	5.0	4.8	5.0	5.1±0.1	4.9±0.1

Дальнейшее снижение концентрации загрязнителя нам не удалось проследить из-за перерыва в исследовании, а также вследствие очередной аварии предположительно в 2014 г. примерно на том же месте. Последовавшее за ней загрязнение оказалось менее существенным по сравнению с 2005 г. Вблизи очага загрязнения (ПП 15) электропроводность составила 210 мкСм/см, а концентрация ионов хлора показала 10-кратное превышение над фоном. С расстоянием от места аварии зафиксировано закономерное уменьшение показателя почти до фоновых значений. Вместе с тем даже на наиболее удаленной площадке в контуре загрязнения (ПП 2) отмечено 3-кратное превышение над фоновыми значениями и 2-кратный рост по сравнению с предыдущим годом.

В 2015 г. на площадках продолжился рост показателя электропроводности и концентрации хлоридов, что может быть объяснено выносом поллютанта с болотными водами за пределы очага загрязнения. По электропроводности наиболее высокие значения фиксировались вблизи места аварии – на ПП 15 (398 мкСм/см), а также на заложенных в 2015 г. ПП 21 (358 мкСм/см) и ПП 22 (489 мкСм/см). При этом концентрация хлоридов могла достигать 200 мг/л и более. Также на ПП 21 и ПП 22 в 2015 г. зафиксировано частичное разрушение растительного покрова; характер повреждения растений указывает на то, что разлив произошел в 2014 г. (в 2015 г. на соснах сохранилась пожелтевшая хвоя). С удалением от места аварии электропроводность и концентрация ионов хлора закономерно уменьшается, но при этом даже на самых удаленных площадках отмечено 2-4-кратное превышение над фоном по анализируемым показателям. Кроме того, загрязнение впервые было зафиксировано на ПП 6Ф, находящейся в 50 м от границы повреждения растительного покрова (3-кратное превышение над фоном по концентрации хлоридов при незначительном росте электропроводности).

В 2016 г. на площадках вблизи очага загрязнения (ПП 15, ПП 21, ПП 22) отмечено снижение концентрации хлоридов. Между тем с удалением от места аварии (ПП 8, 7, 1, 2) концентрация ионов хлора продолжала увеличиваться, указывая на разнос поллютанта на значительную площадь. Сообразно хлоридам менялась электропроводность, уменьшаясь вблизи места аварии и увеличиваясь с расстоянием по сравнению с предыдущим годом.

В 2017 г. по всем площадкам зафиксировано уменьшение концентрации хлоридов в 2,0-3,4 раза, а также 2-кратное снижение электропроводности для площадок ниже по склону. На ПП 6Ф наблюдалось, как и в 2016 г., незначительное превышение концентрации хлоридов над фоном.

В 2018 г. изменения оказались незначительными. На ПП 21 и ПП 22 концентрация хлоридов снизилась всего на 10%. Также на двух указанных площадках сохранились повышенные значения электропроводности (в среднем около 140 мкСм/см). Для ПП ниже по склону концентрация хлоридов возросла в 1,1-1,6 раза, а электропроводность в 1,1-1,4 раза. Рост загрязнения мог быть связан с особенностями разноса поллютанта на фоне колебания уровня болотных вод. При этом на ПП 6Ф (вне зоны видимого воздействия) концентрация ионов хлора опустилась до фонового уровня.

В 2019 г. показатели загрязнения приблизились к фоновому уровню. Концентрация хлоридов на площадках ниже по склону не превышала 2 крат от фона, а электропроводность соответствовала значениям, характерным для незагрязненных участков. По сравнению с 2018 г. концентрация хлоридов снизилась в 2,4-3,2 раза, а электропроводность – в 2,2-2,3 раза. На ПП 21 и ПП 22 сохранилось 2-кратное превышение над фоном по электропроводности и 3-кратное превышение фоновых значений по концентрации хлоридов. Таким образом, ситуация с динамикой загрязнения после 2014 г. оказалась сходной с таковой для первых лет наблюдения – отмечено преимущественно вымывание поллютанта в течение пяти лет после загрязнения.

Изыскание 2023 г. показало очередной скачок концентрации хлоридов и электропроводности. На ПП 21 и ПП 22 электропроводность выросла в 2,1-2,3 раза, для иных площадок зафиксирован 3-4-кратный рост значений. В этот год также существенно возросла концентрация хлоридов – 3-9-кратное превышение по сравнению с 2019 г. Повышение значений анализируемых показателей может быть связано не только с очередным загрязнением, но также с аномально сухим годом (при уменьшении обводнённости как электропроводность, так и концентрация ионов солей должны возрасти). Причины роста значений в последний год наблюдений могут быть выяснены при дальнейших исследованиях.

ВЫВОДЫ

1. На верховом болоте за 20-летний период наблюдений зафиксировано неоднократное повышение концентрации хлоридов и электропроводности (2007, 2014, 2023 гг.), указывая на периодическое попадание поллютанта в окружающую среду.

2. В течение пяти лет с момента аварии происходит снижение электропроводности до значений, близких к фону. Однако при этом сохраняется остаточное загрязнение, фиксируемое в концентрации хлоридов (до 3 крат).

3. При загрязнении участка наблюдается стабильное снижение кислотности болотных вод (увеличение pH в среднем с 4,2 до 5,5), а также изменение структуры растительного покрова (замещение олиготрофных растений мезотрофными и эвтрофными видами).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Г.М. Кукуричкина, Ю.Н. Гуменюк и Т.А. Бейгишиеву за содействие в организации мониторинга и сбор данных на исследуемом участке в 2010, 2014 и 2015 гг. Также выражаем благодарность за совместную работу студентам: О.А. Воробьевой, А.О. Коху, Т.Р. Мельнику и А.С. Петрякину – при проведении исследований в 2016-2023 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- Avetov N.A., Shishkonakova E.A. 2010. Oil pollution of mires in Western Siberia. *Priroda*, 11: 14-24 (in Russian). [Аветов Н.А., Шишконокова Е.А. 2010. Нефтяное загрязнение болот Западной Сибири // Природа. № 11. С. 14-24].
- Ermolov Yu.V., Makhatkov I.D., Milyaeva E.V. 2011. Application conductance-measuring method for studying of self-cleaning of the salted peatbog. In: *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: past and present, Proceedings of the third International Field Symposium*. Novosibirsk, pp. 168-170 (in Russian). [Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Миляева Е. В. 2011. Самоочищение засоленного торфяника по данным кондуктометрических съемок // Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее : материалы III Международного полевого симпозиума. Новосибирск. С. 168-170].
- Ivanov K.E., Novikov S.M. (eds.) 1976. *Bogs of Western Siberia, their structure and hydrological regime*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 447 pp. (in Russian). [1976. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим / ред.: К.Е. Иванов, С.М. Новиков. Л.: Гидрометеиздат. 447 с.].

- Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Salmanov F.K., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Ervyer Yu.G. 1975. *Geology of oil and gas of Western Siberia*. Nedra, Moscow, 680 pp. (in Russian). [Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г. 1975. Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра. 680 с.].
- Lapshina E.D., Bleuten W. 1999. Types of disturbances and self-restoration of vegetation of oligotrophic bogs in oil-production areas of Tomsk province. *Krylovia. Siberian Botanical Journal*, 1 (1): 129-140 (in Russian). [Лапшина Е.Д., Блейтен В. 1999. Типы нарушений и естественное восстановление растительности олиготрофных болот на нефтяных месторождениях Томской области // *Krylovia. Сибирский ботанический журнал*. Т. 1, № 1. С. 129-140].
- Moskovchenko D.V. 2003. Ecological status of rivers of the Ob basin in oil development areas. *Geography and natural resources*, 1: 35-41 (in Russian). [Московченко Д.В. 2003. Экологическое состояние рек Обского бассейна в районах нефтедобычи // *География и природные ресурсы*. № 1. С. 35-41].
- Savichev O.G. 2015. Geochemical parameters of bog waters in the taiga zone of the Western Siberia. *Izvestiya RAN. Series geographical*, 4: 47-57 (in Russian). [Савичев О.Г. 2015. Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири // *Известия РАН. Серия географическая*. № 4. С. 47-57].
- Soromotin A.V., Gashev S.N., Kazantseva M.N. 1996. Salt pollution of taiga biogeocenoses at oil production in the Middle Ob Region. In: *Problems of Geography and Ecology of Western Siberia*. Tyumen State University, Tyumen, pp. 121-131 (in Russian). [Соромотин А.В., Гашев С.Н., Казанцева М.Н. 1996. Солевое загрязнение таежных биогеоценозов при нефтедобыче в Среднем Приобье // *Проблемы географии и экологии Западной Сибири* : сб. науч. ст. Тюмень: Тюмен. гос. ун-т. С. 121-131].
- Shornikova E.A. 2009. Integral assessment of the state of watercourse ecosystems based on hydrochemical indicators. *Geography and Natural Resource*, 1: 38-45 (in Russian). [Шорникова Е.А. 2009. Интегральная оценка состояния экосистем водотоков по гидрохимическим показателям (на примере Среднего Приобья) // *География и природные ресурсы*. № 1. С. 38-45.].
- Tyurin V.N. 2018. Anthropogenic dynamics of bog ecosystems by oil and salt pollution. In: *Proceedings of the «IX meeting in memoriam of Ekaterina Alexeevna Galkina»*. Publishing house «LETI», SPb, pp. 215-218 (in Russian). [Тюрин В.Н. 2018. Антропогенная динамика болотных экосистем при нефтяном и солевом загрязнении // IX Галкинские чтения : сб. материалов конференции. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 215-218].
- Tyurin V.N., Kukurichkin G.M. 2020. Some features of changing in physicochemical parameters of swamp waters with salt pollution (site in Vostochno-Surgutskoye oil field, Surgut lowland of the Western Siberia). *Natural and technical sciences*, 2 (140): 103-107 (in Russian). [Тюрин В.Н., Кукуричкин Г.М. 2020. Некоторые особенности изменения физико-химических параметров болотных вод при солевом загрязнении (участок Восточно-Сургутского месторождения, Сургутская низина Западно-Сибирской равнины) // *Естественные и технические науки*. № 2 (140). С. 103-107]. <https://doi.org/10.25633/ETN.2020.02.10>
- Tyurin V.N., Domakhina V.A. 2023. The features of seasonal dynamics in physicochemical parameters of swamp waters with salt pollution (Vostochno-Surgutskoye oil field, Surgut lowland of the Western Siberia). *Natural and technical sciences*, 7(182): 49-54 (in Russian). [Тюрин В.Н., Домакина В.А. 2023. Особенности сезонной динамики физико-химических параметров болотных вод при солевом загрязнении (Восточно-Сургутское нефтяное месторождение, Сургутская низина Западно-Сибирской равнины) // *Естественные и технические науки*. № 7 (182). С. 49-54]. <https://doi.org/10.25633/ETN.2023.07.03>.
- Vodyanitskiy Yu.N., Avetov N.A., Savichev A.T., Trofimov S.Ya., Shishkonakova E.A. 2013. Influence of oil and stratal water contamination on the ash composition of oligotrophic peat soils in the oil-production area (the Ob' region). *Eurasian Soil Science*, 46(10): 1032-1041 (in Russian). [Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконокова Е.А. 2013. Влияние загрязнения нефтью и пластовыми водами на зольный состав олиготрофных торфяных почв в районе нефтедобычи (Приобье) // *Почвоведение*. № 10. С. 1253-1262]. <https://doi.org/10.7868/s0032180x13100146>.
- Voistinova E.S., Kharanzhevskaya Yu.A. 2013. Features of water chemical composition of bog landscapes in taiga zone of the West Siberia under intensive human impact. *Water: chemistry and ecology*, 8: 8-15 (in Russian). [Воистинова Е.С., Харанжевская Ю.А. 2013. Особенности химического состава вод болотных ландшафтов таежной зоны Западной Сибири в условиях интенсивной антропогенной нагрузки // *Вода: химия и экология*. № 8. С. 8-15].
- Voistinova E.S., Kharanzhevskaya Yu.A. 2014. Changes in chemical composition of the bog water in the Tomsk region under conditions of anthropogenic impact. In: *West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present: Proceedings of the Fourth International Field Symposium*. Publishing house of Tomsk University, Tomsk, pp. 305-307 (in Russian). [Воистинова Е.С., Харанжевская Ю.А. 2014. Изменение химического состава болотных вод в Томской области в условиях антропогенной нагрузки // *Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее* : материалы IV Международного полевого симпозиума. Томск: Изд-во Томского ун-та, С. 305-307].

Поступила в редакцию: 04.06.2024
Переработанный вариант: 19.09.2024

**THE VII INTERNATIONAL FIELD SYMPOSIUM WAS HELD IN YUGRA
“WEST SIBERIAN PEATLANDS AND THE CARBON CYCLE:
PAST AND PRESENT”**

***Kupriianova Iu.V.* , Niyazova A.V., Verevkina E.L., Veretennikova E.E., Shanyeva V.S.,
Ilyasov D.V., Akhmedova I.D., Zmanovskaya A.S., Lapshina E.D.***

Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

*yuli4k.kupryanowa@yandex.ru

Citation: Kupriianova Iu.V., Niyazova A.V., Verevkina E.L., Veretennikova E.E., Shanyeva V.S., Ilyasov D.V., Akhmedova I.D., Zmanovskaya A.S., Lapshina E.D. 2024. The VII International Field Symposium was held in Yugra “West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present”. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(2): 112-126.

DOI: 10.18822/edgcc636708

В статье освещены итоги VII Международного полевого симпозиума «Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее», который состоялся в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре (гг. Ханты-Мансийск, Белоярский) с 16 по 26 августа 2024 года. Симпозиум объединил более 180 ученых специалистов в области болотоведения, экологии и углеродного баланса. Основные темы пленарных и секционных заседаний: роль болот в глобальном цикле углерода, экологическое моделирование, биоразнообразие и экология болот, биогеохимические циклы естественных и антропогенно нарушенных болотных экосистем, биогеохимия торфов и болотных вод, палеоэкология и история развития болотных экосистем, влияние современных климатических изменений на лесоболотные экосистемы. На заседаниях круглых столов участники обсудили возможности использования БПЛА в изучении и картографировании болотных экосистем и поделились опытом реализации лесоклиматических проектов.

Ключевые слова: цикл углерода, биогеохимия торфов и болотных вод, потоки парниковых газов, моделирование, биоразнообразие, палеоэкология, картографирование болот, климатические проекты, WSPCC-2024.

The article covers the results of the VII International Field Symposium "West Siberian Peatlands and the Carbon Cycle: Past and Present", which was held in the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra (Khanty-Mansiysk, Beloyarsky) in August 16–26, 2024. The Symposium brought together over 180 scientists specializing in bog science, ecology and carbon balance. The main topics of the plenary and sectional sessions were: the role of bogs in the global carbon cycle, environmental modeling, biodiversity and ecology of bogs, biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed bog ecosystems, biogeochemistry of peat and bog waters, paleoecology and history of bog ecosystems development, the impact of modern climate change on forest-bog ecosystems. At the roundtable meetings, the participants discussed the possibilities of using unmanned aerial vehicles (UAVs) in the study and mapping of bog ecosystems, and shared their experience in implementation of forest-climate projects.

Key words: carbon cycle, peat mire biogeochemistry, greenhouse gas fluxes, modeling, biodiversity, paleoecology, peatlands mapping, climate projects, WSPCC-2024.

Подведенные итоги и масштабы состоявшегося с 16 по 26 августа 2024 года в городах Ханты-Мансийске и Белоярском Ханты-Мансийского автономного округа – Югры VII Международного полевого симпозиума «Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее» (VII International Field Symposium West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present, WSPCC 2024) впечатляют.

Инициатором проведения симпозиума стал Югорский государственный университет (ЮГУ) при поддержке Правительства Югры. Соорганизаторами выступили: природный парк «Нумто», г. Белоярский; Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск; Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск; Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск; Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва; Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси; Институт географии и агроэкологии КНР (г. Чаньчунь).

Неоценимую помощь в организации и проведении мероприятий симпозиума оказали партнеры Югорского государственного университета: территориально-производственное предприятие «Урайнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» и ПАО «Сургутнефтегаз».

В очно-заочном формате мероприятие объединило более 180 ученых специалистов в области болотоведения, экологии и углеродного баланса из России (20 регионов и 56 научных и научно-образовательных организаций и центров), Китая и Республики Беларусь (приложение).

В приветственной части пленарного заседания в обращениях директора Департамента государственной политики в сфере научно-технологического развития Минобрнауки России Антона Шашкина, директора департамента финансов – заместителя губернатора Югры Веры Дюдиной, главы администрации Белоярского района Сергея Маненкова, ректора ЮГУ Романа Кучина и научного руководителя Института лесоведения РАН, доктора биологических наук, профессора, академика РАН Станислава Вомперского говорилось о значимости проводимого мероприятия, колоссальной проделанной работе со времени проведения предыдущего симпозиума коллектива сотрудников Научно-образовательного центра «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата» ЮГУ под руководством Елены Дмитриевны Лапшиной с точки зрения развития экологической повестки региона и России в целом, о продолжающемся развитии международного полевого стационара «Мухрино» как площадки для выполнения федеральных проектов (карбоновые полигоны и ВИП ГЗ) и являющегося центром компетенции в области климатической повестки, который объединил науку, образование, а также привлек бизнес в реализацию своей программы, о важности привлечения молодых ученых и их роста как специалистов в области современного болотоведения (Рис. 1, 3). Праздничный тон открытию симпозиума задал танец с национальными мотивами Югры, представленный народным самодеятельным коллективом «Увас Хурамат» (Рис. 2).



Рисунок 1. Почетные гости и участники симпозиума на церемонии открытия.



Рисунок 2. Выступление народного самодеятельного коллектива «Увас Хурамат» на открытии симпозиума.



Рисунок 3. Приветственное слово ректора Югорского государственного университета Кучина Р.В.

Пленарные доклады, осветившие климат голоцена, современные изменения климата и роль природно-климатических решений для смягчения их последствий, газообмен CO_2 болот с атмосферой в условиях современного климата, углерод в стоке рек России, торфяники в национальном кадастре парниковых газов, оценку современного состояния болот Беларуси и план их экологической реабилитации в долгосрочном аспекте и, наконец, значимость стационарных исследований болот в северных широтах, задали вектор продуктивной работы секций и развития научных дискуссий (Рис. 4, 5).



Рисунок 4. Пленарный доклад профессора Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Ольчева А.В.



Рисунок 5. Пленарный доклад профессора Института физики атмосферы Китайской академии наук (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. China) Libo Zhou.

Секция «Биогеохимические циклы естественных и антропогенно нарушенных болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод» объединила доклады по исследованию потоков парниковых газов, динамики накопления и запасов углерода и в целом углеродного баланса и его моделированию в болотных экосистемах, гидрологии и экологии болот, биогеохимии торфов и болотных вод (Рис. 6).

В различных временных (сезонный, межгодовой) и пространственных (локальный, региональный, континентальный, глобальный) масштабах были освещены динамика и кумулятивные значения потоков парниковых газов, их реакция на изменение погодных условий; рост, продукция и функциональные признаки сфагновых мхов, запасы фитомассы и углерода, темпы его накопления в Западной Сибири; динамика гидрологических и метеорологических параметров болотных экосистем, моделирование и заполнение пробелов; ретроспективный анализ и построение карт потоков парниковых газов, биотический круговорот пирогенно нарушенных болот и динамика запасов углерода при их экстенсивном осушении. При этом в большинстве сообщений делался акцент на учет микроформ и пространственное взвешивание полученных результатов.

Стоит отметить разнообразие используемых в исследованиях классических и современных методов и их сочетание. Были упомянуты методы укосов, монолитов и кернирования для отбора растительных и торфяных образцов, инкубационные эксперименты, камерные методы с использованием портативных газоанализаторов или лабораторного оборудования и различными модификациями камер, автоматизированные системы (KACM-8 и Flux-NIES), эколого-климатические автоматические станции (пульсационные системы для измерения потоков парниковых газов – Eddy Covariance), методы дистанционного зондирования Земли, хроматография, спектрофотометрия, термический анализ, георадарная съемка, ландшафтно-гидрологический анализ, альтернативные подходы оценки запасов фитомассы с использованием методов измерения потоков CO_2 и дистанционной оценки при помощи БВС и ряд других методов. В связи с этим не менее важным аспектом, затронутым в докладах, является разработка единых методических подходов для оценки биогеохимического цикла углерода в болотных экосистемах России, что требует единства терминологии, классификации, форм представления и сравнения полученных результатов.



Рисунок 6. Участники секции «Биогеохимические циклы естественных и антропогенно нарушенных болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод».

Докладчики представили самые разнообразные модели, отражающие вариации концентраций CO_2 , потоков CO_2 и CH_4 , круговороты углерода в локальном, региональном и глобальном масштабах, а также с учетом типов землепользования, прогнозы при разных сценариях изменения климата: Regional Chemical Transport Model, ансамбль моделей RegCM4 simulations, глобальная модель, оценивающая время хранения углерода в болотах, гидрологическая модель обводнения и восстановления с использованием программного комплекса MIKE SHE, модель, решающая прямую и обратную задачи, а также модель, показывающая биохимические процессы в глубинных слоях верховых болот. Важный аспект во всех исследованиях – качество и количество входных данных и

данных, используемых при верификации модели, междисциплинарный подход и методы заполнения пробелов.

Большинство исследований представляло длительные ряды данных, полученных в результате комплексного подхода и дающих ответ на вопрос: является ли то или иное болото или целая территория источником или стоком углерода?

На секции «Биоразнообразие, типология и охрана болот» были рассмотрены вопросы влияния и прогноз воздействия климатических изменений на болотные экосистемы Башкирского Предуралья, состав и структура бугристо-топьяных болот припечорских тундр, видовое и фитоценоотическое разнообразие болот Башкирского Предуралья, Южного Нечерноземья, природного парка «Нумто», заповедника «Малая Сосьва». Докладчики представили исследования по изучению экологии сфагновых мхов в лабораторных условиях, по оценке растительного покрова придорожных, трансформированных болот и болот в естественном состоянии. Коллеги из Беларуси поделились практическим опытом предотвращения деградации низинных болот путем кошения тростника и древесно-кустарниковой растительности (Рис. 7).

Проводимые исследования показывают важность изучения биоразнообразия болот и отражают особенности их взаимодействия и окружающей среды с точки зрения хозяйственной деятельности человека.



Рисунок 7. Участники секции «Биоразнообразие, типология и картографирование болот».

Доклады секции «Палеоэкология и история развития болот» охватили широкую географию объектов исследования: от Европейской территории России до Дальнего Востока и Восточной Азии (Китай). В представленных исследованиях обсуждались результаты изучения динамики болотных экосистем в различных природных зонах (доклады ученых из Красноярска, Томска, Сургута, Екатеринбурга, Нижневартовска). В этих докладах широко освещались результаты комплексных исследований истории развития болот из разных регионов России, базирующиеся на интеграции методов палеоботаники, палинологии, палеозоологии, палеопочвоведения. В частности, прозвучал доклад об индикаторной роли раковинных амёб, а также доклад о современных методах датирования болотных экосистем (Москва, Beijing). Кроме того, были представлены результаты археологических исследований болотных экосистем (Сургут) (Рис. 8).

Новым пунктом программы симпозиума стало проведение двух круглых столов, темой для которых стали два крайне актуальных направления в национальной климатической повестке:

1) «Дистанционное зондирование и картографирование болот. Обработка данных с БПЛА в оценке углеродного баланса»;

2) «Углеродное регулирование и климатические проекты в условиях изменения климата».

На первом круглом столе было обсуждено использование данных дистанционного зондирования – спутниковых и БПЛА – для разномасштабного картирования типов болот, выявления и предотвращения пожаров, оценки свойств нарушенных торфяников; методические аспекты в использовании лидарных и мультиспектральных данных в изучении углеродного баланса болотных экосистем на региональном и национальном уровнях (Рис. 9). В рамках дискуссии было решено создать рабочую группу по разработке новой национальной типологической карты болотных экосистем. Работу группы предполагается организовать в несколько этапов: сбор имеющихся у различных научных коллективов данных о свойствах растительного покрова болот с привязкой к географическим координатам (в том числе картографических); анализ и обобщение полученных данных; использование полученной информации в качестве основы для дешифрирования болотных экосистем по спутниковым данным дистанционного зондирования.



Рисунок 8. Участники секции «Палеоэкология и история развития болот».

На круглом столе «Углеродное регулирование и климатические проекты в условиях изменения климата» обсуждались вопросы, связанные с возможностью реализации различных типов природно-климатических решений на территории Югры. Открыл заседание круглого стола директор департамента экономического развития – заместитель губернатора Ханты-Мансийского автономного округа – Югры С.А. Афанасьев. В своем выступлении он отметил необходимость адаптации экономики региона к изменениям климата и снижения негативного воздействия на окружающую среду, также подчеркнул, что Югра имеет высокий потенциал для реализации природных климатических проектов и высокий интерес у бизнеса к проектам в сферах «лесное хозяйство» и «землепользование».

Директор Института глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля А.А. Романовская рассказала об общих подходах к реализации экосистемных климатических проектов, их особенностях и проблемах проектирования. Доцент Тверского государственного технического университета К.Л. Шахматов, один из авторов и разработчиков методологии по вторичному обводнению торфяников, поделился опытом реализации климатических проектов по

вторичному обводнению осушенных торфяников и особенностями разработки проектов на основе отечественной методологии.

А.В. Шальков, представляющий Ресурсно-экологический центр «Зеленая цивилизация», который с весны 2024 года является партнером Югорского госуниверситета, рассказал про реализацию инициативы «Южный лесной пояс России», особенностях лесных климатических проектов на землях нелесного фонда.

Опытом взаимодействия с индустриальными партнёрами, реализации лесного климатического проекта, его первыми результатами поделился Н.Н. Харченко, заведующий кафедрой экологии, защиты леса и лесного охотоведения из Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова.

Также опытом реализации лесоклиматических проектов компании «РУСАЛ» поделилась Е.М. Гордеева. В 2024 году компания верифицировала первый результат своего климатического проекта, связанного с охраной лесов от пожаров.

Подводя итоги круглого стола, участники отметили, что необходимо более тщательно подходить к выбору того или иного типа природно-климатического проекта и учитывать природно-географические особенности территорий, на которых планируется реализация таких проектов, также было предложено стандартизировать проектирование природных решений (Рис. 10).

Связующим звеном между двумя круглыми столами стали доклады об использовании данных с БПЛА для реализации климатических проектов и, в частности, по обводнению осушенных торфяников. Важным результатом дискуссии, обобщающей оба круглых стола, стала договоренность о разработке методических рекомендаций к использованию беспилотных летательных аппаратов на различных этапах реализации климатических проектов. Важным аспектом в применении БПЛА в этом аспекте является наземная верификация данных, получаемых дистанционно с достаточной точностью.



Рисунок 9. Заседание круглого стола «Дистанционное зондирование и картографирование болот. Обработка данных с БПЛА в оценке углеродного баланса».



Рисунок 10. Дискуссия на круглом столе «Углеродное регулирование и климатические проекты в условиях изменения климата».

По традиции главной особенностью симпозиума стало проведение ряда полевых экскурсий, первая часть которых предшествовала деловой части, вторая – являлась завершающим аккордом. Также ежедневно после заседания секций были проведены экскурсии по городу Белоярскому с посещением Экоцентра природного парка «Нумто», организовано посещение этнографического центра и деревни казымских ханты для знакомства участников симпозиума с уникальными современными проектами города и культурными особенностями данного региона.

С 15 по 19 августа ученые посетили типичные болота зоны средней тайги ХМАО-Югры, такие как болото Потанай, болота природного парка «Кондинские озера» и полевого стационара «Мухрино» (Рис. 11, 12), а также познакомились с возможностями и эффективностью использования болот в бизнесе на крестьянско-фермерском хозяйстве «Юрты Чайниковых» и болотных участках и производстве фирмы SPHAGNUM ECO по добыче и переработке сфагнового мха.



Рисунок 11. Экскурсия на болото Потанай.



Рисунок 12. Экскурсия в международный полевой стационар «Мухрино».

25 и 26 августа состоялись экскурсии на типичные болота террасных комплексов рек Казым и Обь, создающих особый микроклимат, более мягкий, чем междуречные пространства, где представлены зональные типы болот. Это уже другая биоклиматическая зона и немного другие болота (Рис. 13).



Рисунок 13. Экскурсия на белоярские грядово-мочажинно-озерковые болота.



Рисунок 14. Дискуссия о видовой принадлежности сфагновых мхов на белоярских болотах.

Участие в экскурсиях позволило учёным познакомиться с физиономическим обликом и пространственными масштабами разных типов болот Западной Сибири и сопоставить его с картинкой, которая выделяется дистанционно при картировании, обсудить тонкости отнесения растительных сообществ этих болот к тому или иному классу растительного покрова в системе флористической классификации Браун-Бланке. Молодым специалистам представилась уникальная возможность узнать флористический состав на разных типах болот, овладеть умениями выявить и описать растительные сообщества и запомнить особенности морфологического строения видов, в большей степени сфагновых мхов (Рис. 14). И, что особенно важно, совместно обсудить создание национальной системы мониторинга запасов углерода и потоков углеродосодержащих парниковых газов по части включения в нее репрезентативных болотных станций.

Материалы симпозиума доступны на сайте http://carbon-management.ru/wspcc_2024.

Приложение 1

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СПРАВКА

В симпозиуме приняли участие 182 человека, из них 93 – очно, 50 – онлайн, 39 – заочно, в том числе 43 молодых ученых (студенты, аспиранты).

Среди участников симпозиума:

- представители следующих стран:

Китайская Народная Республика (14 человек),

Республика Беларусь (3 человека),

Российская Федерация (165 человек):

- из 6 федеральных округов:

Дальневосточный федеральный округ – 3 участника,

Приволжский федеральный округ – 9 участников,

Северо-Западный федеральный округ – 27 участников,

Сибирский федеральный округ – 28 участников,

Уральский федеральный округ – 48 участников,

Центральный федеральный округ – 50 участников;

- из 30 городов России, из них

6 муниципалитетов Югры:

Белоярский – 1 участник,

Нижневартовск – 2 участника,

Советский – 2 участника,

Сургут – 6 участников,

Ханты-Мансийск – 20 участников;

- 6 организаций бизнеса (ООО «ЭКХАЙДЕН», ООО МИП «НЦВВЭИ ИГКЭ», ФБУ «Авиалесоохрана», Компания «РУСАЛ», ООО «ЦТУР», Ресурсно-экологический центр «Зеленая цивилизация») – 8 участников (кто был подключен онлайн и участвовал очно);

- 37 научных организаций (104 участника):

Приложение таблица 1

Страна	Город	Место работы, учебы	Число участников
Россия	Архангельск	Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова Уральского отделения Российской академии наук	1
Россия	Белоярский, ХМАО-Югра	Природный парк «Нумто»	1
Россия	Екатеринбург	Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук	6
Россия		Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук	1
Россия	Калининград	Атлантический филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии; Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук	1
Россия	Красноярск	Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук	3
Республика Беларусь	Минск	Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси	3

Приложение таблица 1 продолжение

Страна	Город	Место работы, учебы	Число участников
Россия	Москва Москва	Институт географии Российской академии наук	4
		Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук	1
		Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля	2
		Институт космических исследований Российской академии наук	2
		Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук; БФУ им. И. Канта	2
		Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук	5
		Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук	3
		Почвенный институт им. В. В. Докучаева	1
Россия	Новосибирск	Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук	2
Россия	п. Борок, Ярославская область	Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук	1
Китайская Народная Республика	Пекин	Beijing Normal University	1
		Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences	8
		Institute of Earth Environment Chinese Academy of Sciences	2
Россия	Петрозаводск	Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук»	6
		Карельский научный центр Российской академии наук	3
Россия	Республика Башкортостан, Уфа	Уфимский институт биологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук	2
Россия	Республика Тыва, г. Кызыл	ГБНУ Республики Тыва «Центр биосферных исследований»	1
Россия	с. Успенское, Московская область	Институт лесоведения Российской академии наук	10
Россия	Санкт-Петербург	Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук	4
Россия		Государственный гидрологический институт	5
Китайская народная республика	Сиань	Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research	1
Россия	Советский, ХМАО-Югра	Государственный заповедник «Малая Сосьва»	2
		Природный парк «Кондинские озера» им. Л.Ф. Сташкевича	1
Россия	Сыктывкар	Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук	3

Приложение таблица 1 продолжение

Страна	Город	Место работы, учебы	Число участников
Россия	Томск	Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук	9
		Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева	1
		Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук	1
Россия	Тула	Тульский областной краеведческий музей	1
Россия	Хабаровск	Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук	3
Китайская Народная Республика	Шэньси	Institute of Earth Environment, CAS	1

Приложение таблица 2

20 образовательных организаций (70 участников)

Страна	Город	Место работы, учебы	Число участников
Китайская Народная Республика	Шэнчжэн	Shenzhen MSU-BIT University; Lomonosov Moscow State University	1
Россия	Брянск	Брянский государственный университет им. академика И.Г. Петровского	1
Россия	Воронеж	Воронежский государственный лесотехнический университет	1
Россия	Москва	Департамент государственной политики в сфере научно-технологического развития Министерства науки и высшего образования Российской Федерации	1
Россия	Санкт-Петербург	Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина	1
Россия	Москва	Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова	8
Россия	Краснодарский край, федеральная территория «Сириус»	Научно-технологический университет «Сириус»	1
Россия	Томск	Национальный исследовательский Томский государственный университет	4
Россия	Нижний Новгород	Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина	2
Россия	Нижевартовск	Нижевартовский государственный университет	2
Россия	Санкт-Петербург	Санкт-Петербургский государственный университет	3
Россия	Красноярск	Сибирский федеральный университет	2
Россия	Сургут	Сургутский государственный университет	6
Россия	Тверь	Тверской государственный технический университет	1
Россия	Томск	Томский государственный педагогический университет	4
Россия	Тула	Тульский государственный университет	2
Россия	Тюмень	Тюменский государственный университет	5
Россия	Екатеринбург	Уральский государственный лесотехнический университет	1
Россия	Республика Башкортостан, Уфа	Уфимский государственный нефтяной технический университет	5
Россия	Ханты-Мансийск	Югорский государственный университет	19

Поступила в редакцию: 08.09.2024
Переработанный вариант: 12.09.2024

Научное издание

ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Том 15, выпуск 2/2024

Цена свободная

16+

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

Дата выхода в свет 20.09.2024

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

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

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

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

*Главный редактор:
Глаголев Михаил Владимирович
тел. +7-495-939-48-46
E-mail: m_glagolev@mail.ru*

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

