

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Environmental Dynamics and Global Climate Change



Том
Volume

15

Выпуск
Issue

1

2024



ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Volume 15
Issue 1

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)

Vasilii 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)

Vasilii 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, Republic str., 73. Phone/fax: +7(34922)441-32, WEB: www.arctic.yanao.ru

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Том 15
Выпуск 1
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 Лапшина, д-р биол. наук, профессор (Ханты-Мансийск, Россия)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Е.В. Агбалян, 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. Коцорбенко, 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 (Сукуба, Япония)
С.В. Мамихин, 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. Семеновичев, д-р биол. наук, профессор (Брянск, Россия)
О.Н. Соломина, д-р геогр. наук, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
В.М. Степаненко, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)
А.Л. Степанов, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
П.В. Фролов, канд. биол. наук (Пушино, Россия)
Е.В. Шейн, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
С.А. Шоба, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
М. Ламентович, д-р, профессор (Познань, Польша)
И. Маммарелла, д-р, доцент (Хельсинки, Финляндия)
В.Ф. Варвик, д-р, профессор (Квебек, Канада)

Редакция

О.А. Фролов, 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

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

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>

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENT

ОБЗОРЫ И ЛЕКЦИИ / VIEWS AND LECTURES

Lapshina E.D., Kupriianova I.V.

Spatio-temporal structure of mire landscapes: basic concepts and approaches to classification in national mire science 4–29

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ / EXPERIMENTAL WORKS

Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A., Simonova K.I.

State of island spruce forests in the western part of the Bolshezemelskaya tundra after 23 years 30–67

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ / NOTES

Kutenkov S.A., Kuznetsov O.L., Kantserova L.V., Mironov V.L., Ignashov P.A., Talbonen E.L., Vasyuta V.S.

Phytomass carbon pools of Koivulambisuo mire system (South Karelia) 68–73

ХРОНИКА / CHRONICLE

: Golovatskaya E.A., Gordov E.P.

International conference on environmental observations, modeling and information systems: Enviromis-2024 74–77

SPATIO-TEMPORAL STRUCTURE OF MIRE LANDSCAPES: BASIC CONCEPTS AND APPROACHES TO CLASSIFICATION IN NATIONAL MIRE SCIENCE

Lapshina E.D.^{*1}, Kupriianova Iu.V.¹

¹Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

* e_lapshina@ugrasu.ru

Citation: Lapshina E.D., Kupriianova Iu.V. 2024. Spatio-temporal structure of mire landscapes: basic concepts and approaches to classification in national mire science. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(1): 4-29.

DOI: 10.18822/edgcc633244

Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов наземных экосистем (РИТМ углерода. 2024. URL:<https://ritm-c.ru/>) в рамках одного из направлений Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Российская система климатического мониторинга» предполагает унификацию основных терминов и понятий и их единообразное использование.

В статье приводится обзор и определение основных терминов и понятий, связанных с описанием пространственно-временной организации болотных ландшафтов и возможных подходов к их классификации для оценки запасов углерода и потоков парниковых газов. Подробно рассматриваются территориальные единицы разной размерности (болотные микро-, мезо- и макроландшафты) в зависимости от масштаба и задач проводимых исследований. Сравниваются понятия «болотный микроландшафт» и «болотная фация». Для оценки бюджета углерода первостепенное значение имеет пространственная и функциональная структура болотных фаций и биогеоценозов. Для описания функциональной структуры более подходит понятие «экосистемы».

Наиболее перспективными для генерализации информации о типологическом разнообразии болот крупного региона и всей страны для целей изучения углеродного баланса представляется зонально-географический и ландшафтно-физиономический уровни классификации. Предложена классификация торфяных болот Западной Сибири для целей изучения углеродного баланса, в которой все многообразие болот сведено к семи основным типам, которые в разной степени представлены или выпадают в ряде биоклиматических зон.

Ключевые слова: болотоведение, болотный биогеоценоз, болотная фация, болотная экосистема, торфяное болото, методические рекомендации.

The article provides an overview and definition of the key terms and concepts related to the description of the spatio-temporal organization of mire landscapes as well as possible approaches to their classification for assessing carbon stocks and greenhouse gas fluxes.

The Introduction lists the main biospheric functions of peatlands (Ivanov, 1976; Vitt, Short, 2020; Minayeva, Sirin, 2011; Tanneberger et al., 2021), with carbon dioxide sequestration and carbon accumulation/ storage in peat deposits being the primary one (Vitt, Short, 2020; Qiu et al., 2020; Loisel et al., 2021). In this regard, considerable attention is paid to the issues of gas exchange and peatland carbon balance (van Bellen, Larivière, 2020; Dyukarev et al., 2021; Lourenco et al., 2023; Yang et al., 2023; Golovatskaya et al., 2024).

Currently the development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes of terrestrial ecosystems, including peat mires, (Rhythm of Carbon. 2024. URL: <https://ritm-c.ru/>) is being implemented in Russia within the framework of the key national innovative project "Russian Climate Monitoring System" (Shirov, 2023; Carbon regulation..., 2023). The development of such a methodology presupposes basic terms and concepts unification for their uniform use in the monitoring system to be created.

Young researchers use exclusively computer-based technologies for information search which results in reduced number of references to classical research works of Russian scientists, while methodological approaches and foreign terminology in peat mires study are increasingly borrowed. Based on extensive experience of Russian mire science, the article makes a comparison of the basic terms and concepts widely used in the literature.

In the section "Methodological Bases for Mire Studies" definitions and comparison of the terms "mire" and "peat mire" or "peatlands" (P'yavchenko, 1963; Bogdanovskaya-Guihéneuf, 1969; Nitsenko, 1967; Boch, Masing, 1979; Boch, Smagin, 1993) are provided, and the criteria for attributing lands to these categories are revealed. Two aspects are distinguished when considering the problem of peat mires classification: what to classify, i.e., the problem of the classification object, and how to classify, i.e., the question of classification activity, including the issues of selecting features and choosing classification units (Masing, 1993).

The section "Levels of Mire Landscapes Organization" discusses in detail territorial units of different dimensions (micro-, meso- and macro- mire landscapes) depending on the scope and objectives of the research. The concepts of "mire microlandscape" and "mire facies" are compared. The concept of "microlandscape" represents an elementary unit of the peatland surface (Ivanov, 1976; Galkina, 1946, 1959; Masing, 1974; Boch, Masing, 1979, et al.). It is comparable to "mire sites" or "wetland sites" or "habitats" as understood by Western authors (Euroala et al., 1984; Wells, Zoltai, 1985; Lindsay, 2016). For assessing the carbon budget and the dynamics of its accumulation by mire biogeocenoses, the concept of mire facies is more preferable, since the facies includes the layer of peat deposited under relatively constant conditions of water-mineral nutrition (L'vov, 1974, 1977, 1979). A facies is easily identified in space and quite stable over time. It is the primary (elementary) unit, both of the peat body and of the modern biogeocenotic cover (Lapshina, 2000, 2004). Examples are used to compare the concept of "biogeocenosis" and "mire facies," with the latter being broader both horizontally and vertically.

For the carbon budget estimation, of the three strands of structure study (composition, spatial construction, totality of connections), the spatial one is of major importance, primarily horizontal (morphological) structure, and functional structure of peat mire facies and biogeocenoses (Masing, 1969; Korchagin, 1976). When describing the horizontal structure, we distinguish three levels of subordination of structural units: biogeocenoses, mosaic elements, and smaller structures (moss hummocks, sedge tussocks, stumps, rotten wood, etc.). The concept of "ecosystem" is more suitable for describing the functional structure because functional connections in the form of flows of matter and energy are more amenable to mathematization and modeling than other parameters of the biogeocenosis, which is very important in connection with the development of modern instrumental methods for studying natural systems.

The second part of the article discusses "Main Principles and Approaches to the Mire Landscapes Classification". The zonal-geographical and landscape-physiognomic levels of classification seem to be the most promising for generalizing information about the typological diversity of peat mires in a large region and the entire country for the purposes of studying the carbon balance. At the zonal-geographical level in Western Siberia, types of polygonal mires, palsa mires, raised sphagnum bogs, flatland slightly convex sedge-moss fens and forest swamps, and concave (sedge and reed) mires are distinguished (Romanova, 1976; Semenova, Lapshina, 2001; Lapshina, 2004). According to the physiognomic features, the entire variety of peat mires falls into four main types (categories) (Warner, Rubec, 1997; Lapshina, 2004): 1 – highly productive grassy (reed-large sedge) floodplain mires (marshes), 2 – wooded peatlands or carrs (swamps), 3 – low-productive sedge-moss peat mires (fens), 4 – raised (pine)-shrub-sphagnum mires (bogs). A classification of peat mires in Western Siberia for the purposes of studying the carbon balance is proposed, in which the entire peat mire variety is summarized in seven main types, which are represented to varying degrees or are absent in a number of bioclimatic zones: 1 – shrub-moss and shrub-lichen frozen palsa-mires; 2 – raised pine-dwarf shrub-Sphagnum bogs; 3 – rain fed (ombrotrophic) Sphagnum hollows; 4 – poor (meso-oligotrophic and mesotrophic) sedge-moss hollows fed by rain, run-off and mixed (incl. poor ground discharge) waters; 5 – sedge-hypnum rich fens fed by groundwater; 6 – forest swamps; 7 – meso-eutrophic grassy (large-sedge, reed) floodplain marshes and 'zaimishche'. Two types of peat mire ecosystems – raised bogs and poor sedge-moss lawns – are divided into subtypes (Table 2). For general overview at the country level, it is necessary to compile classification schemes of generalized peat mire types in all other meridional sectors of Russia's territory: Eastern European, East Siberian, and Far Eastern, each with its own characteristics.

Key words: mire science, mire biogeocenosis, mire facies, mire ecosystem, peat mire, methodological recommendations.

Торфяные болота – уникальные природные экосистемы, обладающие способностью аккумулировать огромные запасы пресной воды и накапливать отмерший растительный материал в виде торфа. Они играют важную роль в гидрологическом балансе территории, выполняют функцию естественных фильтров, предотвращая попадание загрязнителей в водотоки (Ivanov, 1976; Vitt, Short, 2020), служат убежищами для многих редких и исчезающих видов животных, растений и грибов (Minayeva, Sirin, 2011; Tanneberger et al., 2021). Однако одной из наиболее важных биосферных функций торфяных болот является связывание углекислого газа и депонирование углерода в торфяной залежи (Vitt, Short, 2020; Qiu et al., 2020; Loisel et al., 2021). Запасы углерода в торфяниках оцениваются в 547 (473–621) Гт (Yu et al., 2010), что составляет около трети мировых запасов почвенного углерода и более половины запасов углерода в атмосфере Земли. Являясь глобальным пулом углерода, торфяные болота имеют непосредственное отношение к поддержанию газового состава атмосферы, выполняя буферную роль в процессах глобального изменения климата.

В последние десятилетия большое внимание уделяется вопросам газообмена и углеродного баланса природных экосистем (Kudryarov, 2015; Gounand et al., 2018), особенно северных торфяников (van Bellen, Larivière, 2020; Dyukarev et al., 2021; Lourenco et al., 2023; Yang et al., 2023; Golovatskaya et al., 2024). В России в рамках одного из направлений Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) «Российская система климатического мониторинга» (Shirov, 2023; Carbon regulation..., 2023) реализуется разработка системы наземного и

дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов (РИТМ углерода. 2024. URL:<https://ritm-c.ru/>). Первоочередной задачей создания национальной сети мониторинга бюджета углерода является разработка единой методики оценки пулов и потоков углерода в наземных экосистемах, в том числе болотных.

В отличие от всех других типов наземных экосистем болотные экосистемы характеризуются незамкнутым циклом круговорота веществ. Высокий уровень болотных вод и недостаток кислорода в корнеобитаемом горизонте приводит к неполному разложению ежегодно отмирающей растительной массы и накоплению ее в виде торфа. При этом болота отличаются высокой горизонтальной неоднородностью растительного покрова и участием в составе доминантов болотных фитоценозов растений разных жизненных форм (деревьев, кустарников, кустарничков, трав, мохообразных), определяющих разный физиономический облик болот. По мере накопления торфа болота формируют собственную гидрологическую сеть с озерами и водотоками, мочажинами и топиями. В результате современные торфяные болота обладают высоко развитыми механизмами саморазвития и имеют характерную тенденцию к формированию сложного рисунка поверхности, являясь уникальными примерами ландшафтного разнообразия природных экосистем (Lapshina, 2003).

Все это требует особого подхода к изучению болот и составлению Методических рекомендаций проведения полевых исследований для оценки пулов и потоков углерода именно в болотных экосистемах с учетом богатого опыта российского болотоведения. Разработка таких рекомендаций предполагает унификацию основных терминов и понятий и их единообразное использование в создаваемой системе мониторинга.

Таким образом, целью статьи является обзор и определение основных терминов и понятий отечественного болотоведения, связанных с описанием пространственно-временной организации болотных ландшафтов и возможных подходов к их классификации для оценки запасов углерода и потоков парниковых газов.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ БОЛОТ

Методическим и методологическим вопросам изучения болот традиционно уделялось большое внимание в трудах отечественных болотоведов (Galkina, 1946, 1959; Bogdanovskaya-Guihéneuf, 1946, 1969; P'yavchenko, 1963, 1972; L'vov, 1974, 1977; Boch, Masing, 1979; Masing, 1988, 1993, 1994). В своих работах практически все исследователи затрагивали вопросы об объеме понятия «болото» и проблеме классификации болот.

Разнообразные точки зрения на определение «болото» были предметом многих исследований и подробно изложены в ряде научных работ (P'yavchenko, 1963; Bogdanovskaya-Guihéneuf, 1969; Nitsenko, 1967; Boch, Masing, 1979; Boch, Smagin, 1993). Большинство специалистов в области изучения болот, геоботаников и географов сходятся во мнении, что их ключевыми характеристиками являются повышенное увлажнение, специфическая влаголюбивая растительность и наличие торфа, хотя соотношение и характер этих компонентов различен среди разных авторов. Под термином «болото» мы понимаем природный ландшафт гидроморфного ряда, для которого характерно постоянное или длительное обильное увлажнение (застойное или слабопроточное), определяющее специфический характер растительности и особый тип почвообразования, одним из проявлений которого является отложение торфа (Lapshina, 2004, 2010).

Границей болота с суходолом считается нулевая торфяная залежь (Razvedka..., 1953). Согласно Водному кодексу Российской Федерации (The Water Code ..., 2006) болота относятся к поверхностным водным объектам, граница которых также определяется по границе торфяной залежи на нулевой глубине (ФЗ № 74-ФЗ, статья 5). В настоящее время торфяные болота рассматриваются как один из нескольких типов водно-болотных угодий (ВБУ) (Wetlands..., 2000).

Однако наличие торфа – признак не абсолютный. Во многих районах широко распространены земли болотного ряда, не накапливающие торфа. К этой категории относятся некоторые типы пойменных земель, которые принято называть «торфянистыми» или «болотистыми лугами» (Shennikov, 1964). Сюда же относятся заболоченные леса, в составе, структуре и почвенном профиле которых все признаки болотного процесса налицо, но слой торфа не выражен. Площадь таких лесов в таежной зоне Западной Сибири составляет не менее 25% от площади всех лесных угодий (Goldin, 1976). Известно, что некоторые из этих заболоченных лесов и лугов могут долгое время находиться в таком состоянии (P'yavchenko, 1985). Несмотря на ярко выраженный болотный процесс, отмершее

органическое вещество здесь успевае́т разрушаться в своей значительной массе, не переходя в торф. Такие земли должны рассматриваться как особые, устойчивые во времени типы ландшафтов.

В других случаях заболоченные земли представляют собой промежуточную стадию формирования болота, которая может быть достаточно быстротечна, особенно при аллохтонном (наползающем) типе заболачивания, и отсутствие торфяного пласта при этом – лишь временное явление.

Для оценки баланса климатически активных веществ в болотных экосистемах России особый интерес представляют торфяные болота, то есть те типы болотных ландшафтов, где болотный процесс находится на высокой стадии развития и выражен не только в чертах состава и строения растительности и почвенных процессах, но и в виде более или менее мощного слоя торфа. В связи с этим, важно провести границу между торфяным болотом и заболоченными землями. К заболоченным землям относят избыточно увлажненные земли со слоем торфа в 30 или 50 см в неосушенном состоянии (Kats, 1941; Vompersky et al., 2011). Более объективным критерием для отнесения участка территории к той или иной категории земель следует считать связь корневых систем древесной растительности с минеральным грунтом. Когда корни живых деревьев теряют такую связь и полностью размещаются в торфяной залежи, следует считать, что стадия заболоченных лесов сменилась болотом (P'yavchenko, 1985). В тундрах, где древесный ярус отсутствует, к торфяным болотам правомерно относить ландшафты, где мощность торфяного горизонта превышает корнеобитаемый слой, который редко достигает 20-30 см.

Еще более сложны и запутаны в болотоведении подходы к типологии и классификации болот. Причины этого кроются в исторически сложившихся направлениях в изучении разных компонентов болот: растительного покрова, гидрологии, торфяного тела. Были предложены генетические (происхождение), геоморфологические, гидрологические (источник питания), фитоценотические и ботанико-географические классификации болот, а также различные ландшафтные классификации, построенные на разных сочетаниях признаков.

С методологической точки зрения в проблеме классификации можно выделить два аспекта: что классифицировать, то есть проблема объекта классификации, и как классифицировать, то есть вопрос классификационной деятельности, включая проблемы подбора признаков и выбора классификационных единиц (Masing, 1993).

В отношении методов и подходов к классификации мы полностью согласны с мнением В.В. Мазинга (1993), что система классификации представляет собой результат творческой деятельности исследователя, а не заложена в самой природе, ее нельзя найти или открыть. Поэтому разные подходы и разные признаки, привлекаемые для упорядочивания тех или иных объектов, вполне правомерны и множественность мнений неизбежна. Ценность классификации определяется тем, насколько она отвечает (соответствует) поставленным научным и практическим задачам, а также возможностью раскрыть с ее помощью какие-то природные связи и закономерности, прийти к новым обобщениям и решениям. Гораздо более важной с методологической точки зрения является проблема объекта классификации, которая связана с особенностями пространственно-временной организации болотных ландшафтов.

УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ БОЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Термин «болото» немасштабная категория. Она не содержит понятия размерности и используется в отношении территориальных выделов разного объема (ранга) от небольших участков болотных массивов до огромных болотных систем. При изучении и классификации болот важно учитывать это обстоятельство.

Первые высказывания о наличии в природе болот разнокачественных объектов и их сочетаний (комплексов) встречаются уже у классиков болотоведения – Р.И. Аболина, В.Н. Сукачева, А.К. Каяндера, Х. Освальда. Однако в наиболее полном и последовательном виде эта идея получила развитие в трудах Е.А. Галкиной (Galkina, 1946, 1955, 1959), которая выделила на болотах территориальные единицы разной размерности: болотные микро-, мезо- и макроландшафты.¹

На необходимость выделения при изучении растительности болот объектов разных уровней, связанных с разными факторами их возникновения, с разным масштабом их отражения на картах и

¹Позднее Е.А. Галкина отказалась от этих терминов и стала использовать «болотные массивы» (болотные урочища) и «болотные системы» (системы урочищ) (Galkina, 1962, 1966).

различиями в их временной динамике во многих своих работах указывает В.В. Мазинг (Masing, 1974, 1988, 1993; 1994; Boch, Masing, 1979). Он выделяет следующие уровни организованности болот и, соответственно, объектов изучения и классификации болотной растительности: элементарные единицы болотной растительности (дерновины мхов, кочки осок), растительность болотных микроформ (гряды, мочажины), растительность болотных фаций или микроландшафтов, растительность простых болотных массивов, растительность болотных систем.

Существование разнокачественных объектов, столь ярко проявляющихся в природе болот, есть отражение более общей закономерности пространственной организации биогеоценотической (ландшафтной) оболочки планеты в целом. Это следует из того факта, что живой покров Земли обладает сложной биологической и географической структурой, одной из форм проявления которой, служат уровни интеграции живого (Shvarts, 1973), объединяющиеся в иерархию живых систем от субклеточных уровней до популяционных и биогеоценотических (L'vov, 1995).

При переходе от одного уровня к другому изменяется объект исследования и предметом изучения становятся новые (иные) признаки и свойства, специфичные для данного уровня. Соответственно меняются и методы исследования, понятийный и терминологический аппарат. Важным является, что каждый уровень исследования осуществляется в своем масштабе работ. Начиная с биогеоценотического уровня, объект исследования – живая система – выходит из области биологических наук и становится объектом географическим. Предметом исследования становятся не организмы и их совокупности, а ландшафты и протекающие в них процессы.

Создаваемая на территории России система наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов предполагает проведение исследований на внутриценотическом (изучение элементов пространственной структуры болотных растительных сообществ), биогеоценотическом (изучение растительности и углеродного баланса болот), ландшафтном (собственно болотоведческие исследования болотных массивов и их систем) и (суб)региональном (болотное районирование) уровнях (Lapshina, 2000; Табл. 1).

Таблица 1. Объекты и уровни исследования болот

Уровень организации	Объекты исследования	Масштаб работ
Внутриценотический	Элемент мозаики (парцелла)	1:100 – 1:1000
Биогеоценотический (ценотический)	Биогеоценоз (фитоценоз)	1:100 – 1:50000
Ландшафтный	Болотная фация	1:10 000 – 1:50 000
	Болотный массив	1:50000–1:500000
	Болотная система	
Субрегиональный	Болотный район	1:500000 – 1:1000000
Региональный	Болотная провинция (зона)	1:1000000 – 1:5000000

Большинство отечественных исследователей болот различают три основных уровня пространственной (хорологической) организации болотных ландшафтов: микроландшафты, мезоландшафты и макроландшафты (Ivanov, 1976; Galkina, 1946, 1959; Masing, 1974; Boch, Masing, 1979 и др.). Остановимся подробнее на каждом из них.

1) *Болотный микроландшафт* представляет собой элементарную единицу болотного ландшафта(поверхности болота) и сопоставима с «болотными участками» (miresites, wetland sites) или «местообитаниями» (habitats) в понимании западных авторов (Euroaetal., 1984; Wells, Zoltai, 1985; Lindsay, 2016).Каждый тип микроландшафта характеризуется специфическими особенностями гидрологического режима, водно-минерального питания, микрорельефа поверхности и растительности. Микроландшафты могут быть гомогенного или комплексного строения в зависимости от характера гидрологических условий в пределах болотного массива или болотной системы. В настоящее время в отечественном болотоведении чаще используется термин «болотный участок» или «болотная фация» (Lopatín, 1954), при этом фация не всегда является идентичной понятию болотного микроландшафта.

Понятие болотной фации

В геологии термин «фация» означает пласт осадочных отложений, накопившийся в одинаковых условиях среды. В ландшафтоведении под фацией понимают низшую типологическую единицу

географической оболочки, которая представляет собой однородный участок земной поверхности со всей совокупностью живых и косных компонентов, сложившихся на нем при определенных условиях в результате длительного развития (Berg, 1945; Solntsev, 1949). На первый план рассмотрения при анализе ландшафтной фации выдвигается её геологическая основа, толща осадочной породы, отложенной за все время существования фации.

В болотных ландшафтах такой осадочной породой является торф, поэтому он должен быть поставлен в основу выделения фаций. Растительность является важным таксономическим признаком при разделении болотных фаций, но лишь постольку, поскольку она является исходным материалом процесса торфообразования с одной стороны, и индикатором экологических условий, в которых протекает этот процесс – с другой. Кроме того, растительный покров и его пространственная структура, наряду с элементами внутриболотной гидрологической сети, являются основными признаками дешифрирования болотных фаций (болотных микроландшафтов) по космическим и аэрофотоснимкам при дистанционных методах исследования (Galkina, 1962, 1966; Terentjeva et al., 2016; Minasny et al., 2019).

Попытки сопоставления единиц болотной растительности и отлагаемых ими видов торфа возникали неоднократно. Наиболее ярким примером этого являются сопряженные классификации болотной растительности и видов торфа, разработанные С.Н. Тюремновым (Туремнов, 1957), «фитоценозы» и «растительные группировки» которого по сути дела соответствуют понятию болотной фации. Большинство же болотоведов, используя ландшафтное понятие «фации», понимают под ним, как правило, фитоценологически однородный выдел болотного массива как простого, так и комплексного строения (Loratin, 1954).

Ф.З. Глебов, рассматривая болотные фации лесной зоны Енисейского левобережья, впервые вводит в это понятие наряду с современным растительным покровом пласт торфа, отложенный именно этим вариантом растительности (Glebov, 1969). Однако это важное теоретическое положение осталось неразвитым. Из-за различной степени изученности компонентов болотного ландшафта автор делит его на два самостоятельных объекта: 1 – все то, что находится на поверхности болота (растительность, микрорельеф и корнеобитаемый слой); 2 – торфяную залежь; и каждый из них характеризует и классифицирует отдельно.

Дальнейшее развитие представления о болотных фациях получили в работах Ю.А. Львова (L'vov, 1974, 1977, 1979). Современные фации закономерным образом размещены в пределах болотного массива и находятся во взаимодействии друг с другом и окружающей средой. Возникновение и развитие фаций в значительной мере определяется климатическими и почвенно-гидрологическими факторами географической среды. Мощным косвенно действующим фактором является рельеф, способствующий перераспределению влаги. Нарастание толщи торфа в процессе развития болота, а также крупные циклические изменения физико-географической среды, приводят к изменению условий водно-минерального питания, в результате чего происходит смена растительного покрова и, соответственно, смена болотных фаций.

Таким образом, геологическим фундаментом для болотной фации служит пласт торфа, который сложен растительными остатками предшествующей фации. Торфяная залежь представляет собой геологическое содержание сменяющих друг друга в процессе развития болотного массива болотных фаций. Верхний пласт торфа принадлежит современной фации, а нижние пласты представляют собой древние (геологические) фации. Геологические фации, исчезнувшие в современном ландшафтном облике болот того или иного района, являются реликтовыми для этого района.

Некоторые авторы считали, что одним из важнейших свойств фации является генетическое единство входящих в её состав болотных участков (Elina, 1968). На этом основании Е.А. Галкина включала в состав фации (микроландшафта) всю торфяную залежь до минерального дна (Galkina, 1959, 1964, 1984). Такое понимание объёма фации, с одной стороны, бесконечно увеличивает их число в соответствии с количеством сочетаний современных пространственно однородных единиц болотного массива, с характером напластования слоев торфяной залежи под ними. С другой стороны, лишает возможности свободного оперирования ими в пространственном и временном отношениях. В результате исчезает основное преимущество понятия «болотной фации», как элементарной пространственно-временной единицы болотного массива. Правильнее торфяную толщу в пределах элементарного болотного участка рассматривать, как свиту болотных фаций (L'vov, 1974), и по признаку сходства строения свит выделять генетически близкие участки болотных массивов.

Некоторые авторы приравнивали понятия биогеоценоза и болотной фации (Bogdanovskaya-Gienef, 1946; P'yavchenko, 1985; Prosorov, 1974), однако фация шире как в горизонтальном, так и в вертикальном плане. Это в первую очередь относится к фациям комплексного строения (грядово-

мочажинным, грядово-озерковым, веретьевым и аапа комплексам), в которых гряды и мочажины, по сути, являются самостоятельными биогеоценозами со своим составом биоты, специфическими экологическими условиями и особенностями функционирования. Нередко и относительно гомогенные пространственно сопряженные участки, занятые близкими по видовому составу биогеоценозами (например, дернистоосоковым, вейниково-дернистоосоковым с редким древесно-кустарниковым ярусом из ив и березы), но отлагающие один вид торфа (дернистоосоковый), входят в состав одной фации.

По мере накопления торфа нижние слои торфяной залежи выходят из пределов биогеоценоза, лишаясь организменной составляющей, но остаются в пределах фации (L'vov, 1979). Однако иногда в природе вертикальные границы биогеоценоза и фации совпадают. Это наблюдается, когда болотный биогеоценоз со сложившейся устойчивой структурой еще не успел отложить свойственного ему пласта торфа. В этом случае его можно рассматривать как неполноценную фацию, лишенную своей геологической составляющей.

Для оценки бюджета углерода и динамики его накопления болотными биогеоценозами использование понятия болотной фации более предпочтительно, чем микроландшафт, под которым, как правило, понимают только участок поверхности болота. В нашем понимании болотная фация – это элементарная ландшафтная единица болотного массива, которая представляет собой совокупность сходных по флористическому составу и структуре болотных биогеоценозов или, напротив, комплекс закономерно сочетающихся на значительном протяжении контрастных биогеоценозов, отлагающих в определенных относительно постоянных условиях водно-минерального питания один вид торфа (простого или комплексного строения). Фация хорошо выражена в пространстве и достаточно устойчива во времени. Она является основной (элементарной) единицей, как торфяного тела, так и современного биогеоценозического покрова (Lapshina, 2000, 2004).

Устойчивость фации контролируется, с одной стороны, действием более высоких уровней организации системы (болотного массива, системы болотных массивов, биогеомассива в целом), ответственных за относительное постоянство абиотической (инвариантной) основы фации, с другой – действием слагающих фацию биогеоценозов с их специфическими фитоценозическими механизмами, обеспечивающими стабильность биотической (динамической) составляющей фации. Одним из таких механизмов является пространственное перемещение экологически разнородных структурных элементов биогеоценоза (например, приствольных повышений и топких микропонижений) в ходе его функционирования.

Структура болотных фаций

В трактовке понятия «структура ценоза» выделяются три основных направления: конституционное (изучающее состав растительных сообществ), пространственное (морфологическое строение) и функциональное (совокупность связей) (Masing, 1969; Korchagin, 1976). В целях изучения бюджета углерода предметом нашего рассмотрения является пространственная (прежде всего горизонтальная) структура болотных фаций, которая в свою очередь складывается из пространственной структуры входящих в её состав биогеоценозов, и функциональная структура, отражающая потоки вещества и энергии.

Пространственная структура болотных фаций и биогеоценозов.

Основой любого наземного биогеоценоза выступает фитоценоз, в границах которого он определяется и существует. Именно растительная компонента создает его пространственную структуру. Под пространственной структурой биогеоценозов понимают размещение отдельных элементов в вертикальном и горизонтальном направлении, что определяется, с одной стороны, набором жизненных форм растений, а с другой – известной неоднородностью и неравномерностью условий абиотической среды, создаваемой на болотах большей частью самими растениями.

Пространственная структура болотных биогеоценозов, как и всяких других, вырабатывалась в течение длительного времени и является результатом сложных взаимоотношений отдельных растений и их групп между собой, и условиями внешней среды (Shennikov, 1964; Sukachev, 1973). Развитие того или иного типа структуры в пределах болотной фации является отражением всего комплекса абиотических условий – той инвариантной основы, на которой формируется фация.

Специфической особенностью болотных ландшафтов является резко выраженная неоднородность их горизонтального строения, которая, как правило, связана с микрорельефом. Известно, что формирование микрокомплексности, как общеприродной закономерности,

наблюдается в случае частичной утраты растительностью её эдификаторных свойств и выдвигания на первый план абиотических условий среды (Lopatin, 1958). На болотах основным средообразующим фактором, приводящим к развитию микрокомплексности, является обильное увлажнение. Увеличение же в субстрате (торфе) воды сверх его полной влагоёмкости ведет к возрастанию гомогенности растительного покрова.

Различают два типа пространственной неоднородности растительного покрова: мозаичность и комплексность (Yaroshenko, 1961; Shennikov, 1964; Sukachev, 1972; Korchagin, 1976 и др.). Большинство авторов под мозаичностью понимают внутреннюю неоднородность фитоценоза. В комплексе же всегда участвуют фитоценозы двух или нескольких ассоциаций. Таким образом, решение вопроса о комплексности растительного покрова вытекает из понимания объёма фитоценоза и растительной ассоциации. Наибольшее расхождение взглядов относительно объёма фитоценологических единиц наблюдается именно на этом уровне и вызвано это объективными причинами.

Представление о фитоценозах складывалось и развивалось на примере лесной растительности. Выделение их проводилось по доминантам всех ярусов, которые в лесах хорошо заметны и пространственно выражены. В дальнейшем при использовании этого понятия для изучения луговой и болотной растительности обнаружились значительные трудности. В первом случае – вследствие большого числа и непостоянства доминантов, во втором – за счет резко выраженного микрорельефа и сочетания мелких пятен с различным набором доминантов.

Основываясь на доминантном принципе, многие болотоведы пришли к очень дробному пониманию болотных фитоценозов (Lopatin, 1949; Liss, Berezina, 1981; Lissetal., 2001 и многие другие). В качестве теоретического обоснования данного подхода использовано положение о соответствии линейных размеров эдификаторов, которыми на болотах являются, как правило, травы и мхи, площади образованных ими сообществ. В результате отдельные фитоценозы на болотах стали измерять квадратными дециметрами и метрами. Другие исследователи (Tyuremnov, 1957; P'yavchenko, 1985; Galanina, 2004; Lapshina, 2010; Volkova, 2018, Ivchenko, 2019; Kuznetsov, 2023 и др.) оставались на позициях широкого понимания болотных сообществ, пренебрегая мелкими неоднородностями напочвенного покрова.

Занимаясь изучением пространственной структуры разных типов биогеоценозов (лесных, луговых, болотных), мы пришли к выводу о соизмеримости площадей природных единиц данного ранга независимо от жизненной формы эдификатора их растительного компонента (Lapshina, 1987, 2004). В этом отношении основную роль играют растения, выполняющие структурообразующую функцию и связывающие отдельные элементы растительной мозаики в единое целое – фитоценоз. При этом они не всегда оказываются эдификаторами (например, корневищные травы и осоки в гипновой топи или кустарнички и деревья на сфагновом болоте).

Общепризнанно, что одним из важнейших признаков фитоценоза является наличие взаимодействия между растениями (Lavrenko, 1959; Sukachev, 1975). В экстремальных условиях среды (тундровых, болотных, полупустынных) эта взаимозависимость лишь затушевывается резко выраженной неоднородностью растительного покрова. Детальные исследования, проведенные в пятнистой тундре (Aleksandrova, 1962) показали, что подземные органы растений распределены значительно равномернее, чем их наземные части. Наши исследования также подтверждают наличие тесного взаимодействия корневых систем болотных растений, приуроченных к разным пятнам мозаики, в том числе и связанной с элементами микрорельефа (Lapshina, 1987).

В своей работе при рассмотрении горизонтальной структуры болотных фаций мы выделяем три уровня соподчиненности структурных единиц: биогеоценозы, элементы мозаики и более мелкие структуры. Биогеоценозы являются наиболее крупными элементами болотной фации, которые связаны с некоторой неоднородностью абиотических условий в пределах фации, и относительно постоянны во времени. Отдельному выделу фации часто соответствует один биогеоценоз.

Комплексные фации характеризуются закономерным сочетанием биогеоценозов или их фрагментов. Фрагменты биогеоценозов обладают всеми специфическими особенностями соответствующих биогеоценозов, но выражены на участках меньшей площади выявления их полного видового состава и особенностей горизонтальной структуры (Sukachev, 1964, 1972). Значительные размеры чередующихся в пространстве биогеоценозов (хотя бы одного из членов комплекса) исключают возможность взаимодействия других его компонентов. Торфяная залежь их характеризуется комплексным строением, причем пласты торфа, отложенные разными биогеоценозами, определенным образом сочетаясь друг с другом, могут достигать значительной мощности.

Болотные биогеоценозы в свою очередь состоят из более мелких структурных единиц (L'vov, 1979), элементов мозаики, которые соответствуют понятию парцелл в лесных биогеоценозах (Dylis, 1969). Эти единицы формируются в процессе функционирования биотической составляющей биогеоценозов и в болотных условиях связаны, как правило, с элементами нанорельефа (например, приствольные повышения деревьев или их групп и топких понижения между ними) или клоновым развитием болотных растений (например, пятна мозаики осок и трав в гипновой топи). Такие элементы мозаики – наименьший по размерам элемент горизонтального расчленения биогеоценозов, охватывающий все его горизонты вертикальной структуры, и поэтому обладающий определенной целостностью. В горизонтальном плане они связаны между собой посредством корневых систем растений-структурообразователей.

В отличие от биогеоценозов, которые относительно устойчивы, элементы мозаики перемещаются в пространстве со скоростью соответствующей длительности жизни основных строителей сообществ. В результате микрокомплексность торфяной залежи, вызванная мозаичным строением биогеоценоза, выявляется в виде флуктуаций ботанического состава относительно однородного пласта.

Горизонтальная неоднородность растительного покрова имеет и более мелкие формы, но это касается уже структуры отдельных биогеогоризонтов, а не всего биогеоценоза в целом (L'vov, 1979). К ним относятся дерновины сфагновых и гипновых мхов, осоковые кочки, пни, валежины и т.д. Они соответствуют элементарному уровню исследования болотной растительности. Эти неоднородности растительного покрова отражаются в торфе, но не выявляются современными методами его анализа.

Функциональная структура болотных биогеоценозов. Экосистема биогеоценоза.

Наряду с понятием «болотный биогеоценоз» мы широко пользуемся понятием «болотные экосистемы». Основное расхождение представлений о биогеоценозах и экосистемах заключается в том, что если биогеоценозы выделяются как участки биогеоценотической оболочки и включают в себя все компоненты в пределах своих границ, то экосистемы выделяются по признаку трофических цепей (Aleksandrova, 1971; L'vov, 1979) и не обязательно включают все элементы биосферы на данном участке.

Экосистема – внеранговое понятие. Экосистемы могут быть очень крупными и совсем небольшими. Различают три категории экосистем: микроэкосистемы (типа пня дерева, муравейника, навозной кучи); мезоэкосистемы, обычно равные фитоценозу (биогеоценозу) и макроэкосистемы типа тундры, пустыни или океана (Duvigneaud, Tanghe, 1973; Dreux, 1976). Все они обладают определенной стабильностью и в каждой из них происходит свой обмен веществ.

Несмотря на свою безранговость понятие экосистемы более универсально, чем биогеоценоз, поскольку может быть применено не только к наземным, но и к водным и антропогенным системам. Кроме того, функциональные связи в форме потоков вещества и энергии легче поддаются математизации и моделированию, чем другие параметры биогеоценоза, что очень важно в связи с развитием современных инструментальных методов изучения природных систем.

С функциональной точки зрения биогеоценоз принято рассматривать как систему, состоящую из определенных блоков, в каждом из которых существуют запасы веществ и энергии (Titlyanova, 1976). Блоки связаны между собой и окружающей средой потоками вещества и энергии. Таким образом экосистема биогеоценоза представляет собой систему его внутренних функциональных связей.

2) *Болотный мезоландшафт* представляет собой отдельный болотный массив простого или более сложного строения, развивающийся из одного генетического центра (центра торфонакопления). На ранних стадиях развития болотного массива может наблюдаться слияние нескольких генетических центров в пределах одной геоморфологической поверхности, но в дальнейшем их развитие происходит в виде одного торфяного тела с единой гидрологией. Как правило, болотные мезоландшафты ограничены одной болотной впадиной и более или менее отчетливо выделяются на фоне незаболоченных территорий.

Болотный массив (болотный мезоландшафт) рассматривается Е.А. Галкиной в качестве основной ландшафтной единицы, способной к саморазвитию и состоящий из совокупности взаимосвязанных в пространстве и взаимообусловленных болотных микроландшафтов (Galkina, 1959, 1962, 1966).

В процессе торфонакопления и разрастания болот вширь отдельные болотные массивы (мезоландшафты) сливаются друг с другом. В результате образуются сложные болотные образования – болотные системы.

3) *Болотный макроландшафт* представляет собой крупную болотную систему комплексного строения, которая формируется в результате слияния первоначально изолированных, нередко заметно различающихся по гидрологическим условиям и типу водно-минерального питания болотных мезоландшафтов, которые возникли в отдельных генетических центрах и долгое время развивались независимо друг от друга. Слияние их происходит на поздних стадиях развития. В пределах болотных макроландшафтов часто встречаются минеральные острова с лесом, остаточные водоемы и водотоки.

Различают простые и сложные системы болотных массивов (Yurkovskaya, 1969, 1988). Простая болотная система состоит из двух или более болотных массивов, находящихся на одной или близких стадиях развития. Сложная болотная система включает разнотипные болотные массивы, находящиеся на разных стадиях развития. Хорошим примером болотного макроландшафта сложного строения может служить Большое Васюганское болото – крупнейшая болотная система земного шара, площадь которой составляет более 5 млн га (Bolshoe Vasyuganskoe ..., 2002).

В условиях Западно-Сибирской равнины с ее выровненным рельефом, высокой степенью заболоченности и заторфованности, болота представлены в основном крупными болотными массивами сложного строения и обширными болотными системами. На практике нередко бывает трудно разделить пространственные (хорологические) единицы разного уровня, особенно мезо- и макроландшафты. Ясные границы между этими двумя уровнями ландшафтной организации болотных систем нередко отсутствуют.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К КЛАССИФИКАЦИИ БОЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ

В большинстве существующих классификаций болотных ландшафтов, их рассматривают на уровне болотных массивов (Tzinserling, 1938; Galkina, 1946; Nitsenko, 1967; Yurkovskaya, 1992) или болотных фаций (болотных микроландшафтов, болотных участков или биогеоценозов) (Romanova, 1964; Glebov, 1969; Prozorov, 1974; Ivanov, 1976; Glebovetal. 1978; Lissetal., 2001; Lapshina, 1987, 2004 и др.).

При этом классификация базируется на каком-либо одном, наиболее важном с точки зрения исследователя признаке: геоморфологическом залегании (Vinogradova, 1957; P'yavchenko, 1958; Rubtsov, 1974; Galkina 1959 и др.), условиях водно-минерального питания (Sjörs, 1950), растительном покрове (Tsinzerling, 1938; Kats, 1948, 1971; Lopatin, 1954; Tyuremnov, 1957; Prozorov, 1974; Yurkovskaya, 1974, 1975 и др.).

Имеется также большое число классификаций болот, основанных на совокупности разных признаков – растительности и географии (Tsinzerling, 1938; Yurkovskaya, 1974, 1992), положении в рельефе, гидрологии, растительности, истории развития и т.д. (Elina, 1974; Romanova, 1974; Kaule, 1976; Lissetal., 2001 и др.). Стремление учесть наиболее полный набор признаков направлено на построение универсальной классификации болот. Предполагалось, что такая классификация будет наиболее полно отражать все многообразие и природу болот. Однако попытки одновременно использовать много признаков не дали ожидаемых исчерпывающих классификаций. В результате появлялось очень большое количество трудно сопоставимых между собой, в значительной мере уникальных либо формальных типологических единиц.

В последнее время наметилась тенденция построения классификационных систем по отдельно взятым признакам с последующим их совмещением (Lapshina, 2004).

В качестве наиболее важных признаков болотных ландшафтов, которые и раньше в той или иной мере использовались при классификации болот, являются следующие: 1 – принадлежность биоклиматической зоне, 2 – принадлежность определенной геолого-генетической поверхности, 3 – положение в рельефе, 4 – особенности водно-минерального питания, 5 – ландшафтно-физиономический облик, 6 – современная растительность и отлагаемый ею пласт торфа. По каждому из этих признаков можно провести самостоятельные классификации, которые будут представлять соответствующие уровни (слои) общей классификационной схемы: зонально-географический,

геолого-генетический, геоморфологический, гидролого-геохимический, ландшафтно-физиономический (Приложение табл. П1, П2, П3).

По мере необходимости и наличия информации число уровней может дополняться, и в пределах каждого из них классификационная система может развиваться линейно и иерархически. В зависимости от масштаба и конкретных задач исследования используется один или несколько уровней классификации, а основными типологическими единицами могут выступать крупные болотные системы, определяющие общий ландшафтный облик территории, болотные массивы или отдельные болотные фации (микрорландшафты, болотные участки).

На практике далеко не всегда возникает необходимость разработки детальной классификации болотных ландшафтов. Дробность классификации и, соответственно, число типологических единиц легенды определяются (задаются), с одной стороны, техническими возможностями их выявления (дешифрирования, «узнавания») на космических и аэрофотоснимках определенного масштаба, с другой – степенью обеспеченности выделяемых типов болотных ландшафтов содержательной (атрибутивной) информацией.

На ключевых участках (полигонах) оценка круговорота углерода и накопления его в торфяной залежи проводится в конкретных болотных биогеоценозах и болотных фациях, выявляемых на космических снимках высокого разрешения и аэрофотоснимках по горизонтальной структуре современного растительного покрова (Usova, 2009; Mahdavi et al., 2018). Однако охватить наземными исследованиями все разнообразие болотных биогеоценозов и болотных фаций в масштабе страны не представляется возможным.

Наиболее перспективными для генерализации информации о типологическом разнообразии болотных ландшафтов крупного региона и всей страны для целей изучения углеродного баланса представляется зонально-географический и ландшафтно-физиономический уровни классификации.

Зонально-географические типы болот

Зонально-географический тип болот отражает общие условия развития болотных ландшафтов в связи с глобальными зонально-климатическими подразделениями земной поверхности. Изменение соотношения тепла и влаги по широте приводят не только к формированию зональных, климатически обусловленных типов растительности (тундровой, таежной, хвойно-широколиственной или степной), но и к развитию болот определенного физиономического облика и структуры поверхности.

В направлении с севера на юг на равнинах Северной Евразии выделяются следующие зонально-географические типы болот (Tsinzerling, 1938; Kats, 1971; Boch, Masing, 1979; Yurkovskaya, 1992, 2010; Mires..., 2017): полигональные (арктические осоковые), бугристые, выпуклые сфагновые, плоские (гипновые и лесные), вогнутые (осоковые и тростниковые).² Наиболее отчетливо болотные зоны выражены на равнинной территории Западной Сибири (Приложение табл. П1; Romanova, 1976; Semenova, Lapshina, 2001; Lapshina, 2004).

Тип полигональных болот – развит в тундре, современный рисунок поверхности обусловлен морозобойным растрескиванием грунта, что наблюдается на плоских слабо дренированных речных и морских террасах и по заболоченным днищам бывших озер (хасыреев). Торфонакопление лимитируется низкими температурами и небольшой продолжительностью вегетационного сезона. Глубина сезонного оттаивания от 15–20 см на валиках до 40–50 см в центре обводненных полигонов. Несмотря на свой древний (раннеголоценовый) возраст, полигональные болота находятся на эвтрофной стадии развития, что обусловлено распространением невыщелоченных и слабо выщелоченных подстилающих грунтов.

Тип бугристых болот – особо характерен для лесотундры и северной тайги. Структура поверхности обусловлена процессами термокарста (протаивания в мерзлом грунте) и мерзлотного пучения. Занимают обширные площади междуречных пространств. Высота бугров определяется местными гидрологическими условиями и зависит от количества притекающей на болото влаги. Торфонакопление осуществляется в основном в термокарстовых депрессиях между буграми.

²В европейской части России в качестве особого зонального типа выделяют также аапа болота, где они распространены преимущественно в зоне лесотундры и северной тайги. Позднее аапа болота были обнаружены в лесной зоне Западной и Восточной Сибири. К аапа типу относят минеротрофные сильно обводненные болота с вогнутой поверхностью и хорошо выраженными узкими грядами, ориентированными перпендикулярно направлению стока. Их развитие связано, прежде всего, с особенностями водно-минерального питания и гидрологического режима и в меньшей степени обусловлено климатом.

Основная масса бугристых болот вступила в олиготрофную стадию развития, при этом соотношение верховых, переходных и низинных торфов в торфяных залежах примерно одинаково.

Тип выпуклых (сфагновых комплексных) болот – абсолютно доминирует в средней и южной тайге. Выпуклая поверхность обусловлена оптимальными климатическими условиями торфонакопления (преобладание осадков над испарением). Сложная структура поверхности (гряды, мочажины, озерки, рямы и их разнообразные сочетания) формируется в результате поверхностного внутриболотного стока. Болота этого типа питаются атмосферными осадками и развиваются на всех типах поверхности, в том числе на речных террасах и междуречных пространствах, занимая обширные площади.

Тип плоских и слабовыпуклых (глиновых и лесных) болот – характерен для южной части лесной зоны или подтайги. Поверхность плоская или слабо наклоненная в сторону основного водоприемника. Несмотря на заметное сокращение роли атмосферных осадков в питании болот, они активно развиваются не только в долинах рек, так и за их пределами, занимая обширные площади в южной части междуречья Оби и Иртыша, или представлены многочисленными изолированными болотными массивами. Имеют гомогенное или комплексное строение, образуя веретьевые комплексы.

Тип вогнутых (осоковых и тростниковых) болот – развивается в пределах лесостепной и степной зон, в условиях постоянного дефицита атмосферной влаги. Размещаются в неглубоких депрессиях, преимущественно в виде четко отграниченных болотных массивов и в долинах рек. Торфонакопление лимитировано резкими сезонными колебаниями уровня грунтовых вод. Верховые сфагновые участки имеют крайне ограниченное распространение и представлены редкими островами «рямов» в окружении низинных травяных (осоково-тростниковых) болот, известных в Сибири под названием – «займищ».

Физиономический тип (облик) болот

Физиономический облик растительного покрова болот является интегральным показателем (своего рода индикатором) всего комплекса экологических условий болотных местообитаний, среди которых наиболее важными являются уровень увлажнения и степень обеспеченности торфяного субстрата элементами минерального питания и азотом.

По физиономическому облику все многообразие болотных ландшафтов можно объединить в четыре основных типа (категории) (Warner, Rubec, 1997; Lapshina, 2004): 1 – высокопродуктивные травяные (тростниково-крупноосоковые) пойменные болота (marshes), 2 – лесные болота или согры (swamps), 3 – низкопродуктивные осоково-моховые топяные болота (fens), 4 – выпуклые (сосново)-кустарничково-сфагновые болота (bogs).

Каждая из этих категорий может использоваться на различных уровнях пространственной организации болотных экосистем от уровня болотной фации (болотного микроландшафта) до болотного массива (болотного мезоландшафта) и системы болотных массивов (болотного макроландшафта). На высоких уровнях пространственной организации принадлежность к тому или иному физиономическому типу определяется преобладанием соответствующего физиономического типа растительности в пределах болотного массива или системы.

Высокопродуктивные травяные пойменные болота (marshes). Маршами называются водно-болотные угодья (wetlands), которые связаны с мелководьями, где уровень воды изменяется в разные сезоны года и по годам вследствие затопления полыми или тальми снеговыми водами и испарения. Марши в материковой части Северной Евразии ассоциируются главным образом с обширными поймами рек и их крупных притоков. В лесостепной и степной зонах Западной Сибири к ним относятся займища и прибрежные заросли на мелководьях замкнутых озер. В русскоязычной литературе маршам соответствует и чаще используются термины «болотистые и торфянистые луга», «низинные травяные болота».

Марши характеризуются относительно высоким плодородием, которое обеспечивается частичной минерализацией органического вещества, в том числе илистой фракции, приносимой полыми водами. Сравнительно высокое плодородие местообитаний выражается в более высокой продуктивности растительного покрова по сравнению с другими типами болотных ландшафтов. Растительность маршей характеризуются высокотравными крупноосоковыми и тростниковыми сообществами, развивающимися в застойных условиях высокого увлажнения.

По характеру растительного покрова высокопродуктивные травяные пойменные болота (marshes), развивающиеся на органно-минеральных и торфяных отложениях, соответствуют преимущественно классу *Phragmito-Magnocaricetea* Klika in Klika et Novak 1941 и близким к нему

синтаксонам союза *Salicypentandrae-Betulionpubescentis* Clausnitzerin Dengler et al. 2004 класса *Alnetea-glutinosae* Br.-Bl. et Tx. ex Westhoff et al. 1946 эколого-флористической классификации.

Лесные болота – черноольшаники и согры (swamps). Отличительной особенностью лесных болот является развитие хорошо выраженного древостоя (нередко лесного облика) высотой от 8-10 до 22 (25) м с общим проективным покрытием крон более 30%. Они откладывают древесный или богатый древесными остатками торф. Лесные болота характеризуются хорошо выраженным микрорельефом, образованным приствольными повышениями, корневыми системами деревьев и осоковыми кочками. Микроповышения обычно на 20-50 см превышают уровень глубоких топких понижений. Средний уровень болотных вод в летний период располагается у поверхности межкочий или на 5-10 см превышает ее. В зависимости от обеспеченности местообитаний лесных болот растворенными основаниями и азотом выделяются эвтрофные (nutrient rich), мезотрофные богатые основаниями (base-rich, sub-neutral) и мезотрофные бедные основаниями (base-poor) лесные болота. Первые большей частью ассоциируются с черноольховыми болотами европейской части России. Лесные болота бореального облика (согры) с участием в древесном ярусе ели, кедра сибирского, березы, лиственницы распространены в Сибири.

Все лесные болота европейской части России и южной части лесной зоны Западной Сибири, как особый физиономический тип болотных ландшафтов, целиком соответствуют классу *Alnetea glutinosae*, несмотря на всю широту диапазона экологических условий и большое разнообразие растительных сообществ, представленных в пределах данного типа.

Топяные осоково-моховые болота (fens). Осоково-моховые топи (fens) представляют собой открытые, реже слабо залесенные, преимущественно минеротрофные болота или их отдельные участки (болотные фации). Многочисленные обводненные сфагновые мочажины в пределах омбротрофных болотных комплексов исключительно атмосферного питания также могут быть отнесены к этому физиономическому типу болот.

В целом осоково-моховые топи (fens) характеризуются растительностью с доминированием крупных (*Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*) или низкорослых осок и других низких трав (*Eriophorum*, *Rhynchospora*, *Scheuchzeria*) с хорошо выраженным моховым покровом или без него. Кустарниковые березки (0.5–1.5 м высотой), реже деревья (3–6 м высотой), могут также играть заметную роль в топиях с высоким уровнем стояния болотных вод, вследствие развития микрорельефа в виде мягких моховых кочек. Видовой состав растительных сообществ в топиях может сильно различаться в зависимости от степени их проточности и химического состава болотных вод.

Топяные участки болот с кислыми условиями среды и особо низким содержанием в воде минеральных веществ относятся к экстремально бедным топиям (extremely poor fens). Топи с менее кислым субстратом (преимущественно проточные) и более или менее бедные основаниями относятся к бедным и умеренно богатым топиям (poor and moderate poor fens). Первые отличаются развитием сплошного ковра сфагновых мхов, вторые характеризуются участием в моховом покрове, как сфагновых, так и гипновых мхов и мезотрофных видов осок и болотнотравья. Топи с условиями среды близкими к нейтральным и более высокой концентрацией растворенных минеральных веществ составляют группу топей богатых основаниями (base rich), где доминируют осок, кальцефильные травы и гипновые мхи (*Bryum pseudotriquetrum*, *Drepanocladus* spp., *Hamatocaulis vernicosus*, *Tomentypnum nitens*).

Осоково-моховые топи (fens), как особый физиономический тип болотных ландшафтов, по комплексу экологических условий и растительному покрову полностью отвечает разным союзам класса *Scheuchzeriopalustris-Cariceteanigrae* Tx. 1937 эколого-флористической классификации.

Выпуклые (сосново)-кустарничково сфагновые болота (bogs). Сосново-кустарничково сфагновое болото как физиономический тип (соответствует английскому термину «bog»), применительно к отдельному болотному массиву или крупной болотной системе представляет собой торфяное болото верхового типа. Такие болота характеризуются сравнительно высокой скоростью аккумуляции торфа, выпуклой формой поверхности и уровня болотных вод, развитием разнообразных комплексов с грядами, мочажинами и вторичными озерками, доминированием сфагновых мхов, главным образом *Sphagnum fuscum*, *S. angustifolium*, *S. divinum* и эрикоидными (ксероморфными) кустарничками в растительном покрове; развитым низкорослым древесным ярусом из сосны, реже без него. Верховые (сосново)-кустарничково сфагновые болота возвышаются над окружающими участками топей, лесных болот и суходолов на 3-5 (8) метров.

В лесной зоне Западной Сибири такие выпуклые кустарничково-сфагновые участки болот всегда покрыты более или менее ясно выраженным ярусом сосны, но высота деревьев различается от 0.4-1(1.5) до 8-10 м в зависимости от уровня болотных вод, который располагается на глубине от 20

до 60-70 см ниже поверхности. Единственным источником водного питания сосново-кустарничково-сфагновых болот являются бедные растворенными минеральными веществами атмосферные осадки.

Выпуклое сосново-кустарничково-сфагновое болото (bog), как физиономический тип растительности болотных ландшафтов, полностью соответствует в широком смысле классу *Oxycocco-Sphagnetea* Br.-Bl. et Tx. ex Westhoff et al. 1946 эколого-флористической классификации болотной растительности.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТОРФЯНЫХ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИЗУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА

Ранее нами была предложена классификационная схема торфяных болот лесной зоны Западной Сибири с целью обобщения и экстраполяции результатов инструментальных измерений основных составляющих углеродного баланса (первичной продукции, эмиссии углекислого газа и метана), а также оценки динамики накопления углерода в торфяных залежах, полученных на модельных объектах в пределах ключевых участков на территории лесной зоны Западной Сибири (Lapshina, 2004). Она включала пять типов болот и заболоченные леса.

Все разнообразие преобладающих типов собственно болотных экосистем на территории всей Западной Сибири по особенностям их структуры и функционирования может быть сведено к семи основным единицам (типам болот и болотных участков): 1 – кустарничково-дикрановые, кустарничково-сфагновые и кустарничково-лишайниковые мерзлые торфяные бугры; 2 – рямы (выпуклые сосново-кустарничково-сфагновые болота); 3 – омбротрофные сфагновые топи и мочажины; 4 – бедные (мезоолиготрофные и мезотрофные) осоково-моховые топи атмосферного и смешанного питания; 5 – богатые гипновые топи грунтового питания; 6 – лесные болота (согры); 7 – мезоэвтрофные травяные (крупноосоковые, тростниковые) пойменные болота и займища. Два типа болотных экосистем – рямы и бедные осоково-моховые топи – разделяются на подтипы (Табл. 2).

Таблица 2. Обобщенные типы болотных экосистем и их распространение в Западной Сибири

Обобщенные типы болот и болотных участков	Т	СТ/ЛТ	СрТ	ЮТ	ЛС/С
1. Мерзлые торфяные бугры и валики					
2. Рямы (сосново-кустарничково-сфагновые)					
2.1. Рослые рямы		Сев. рям			
2.2. Типичные рямы и рямовые гряды					+
3. Омбротрофные мочажины и сфагновые топи					
4. Бедные осоково-моховые топи:					
4.1. МО осоково-сфагновые топи					
4.2. М осоково-болотнотравно-сфагновые топи					
4.3. М Осоково-гипновые топи					
5. Богатые гипновые топи			+		
6. Лесные болота (согры)		+			+
7. Травяные пойменные болота и займища	+	+	+	+	

Примечание. Биоклиматические зоны и соответствующие им болотные зоны, выделенные по преобладающим типам болот: Т – тундра (зона полигональных болот), СТ/ЛТ – северная тайга и лесотундра (зона бугристых болот), СрТ – средняя тайга (зона сфагновых выпуклых болот), ЮТ – южная тайга, включая зону подтайги или березово-осиновых лесов (зона плоских гипновых и лесных болот), ЛС/С – лесостепь и степь (зона вогнутых травяных болот).

МО – мезоолиготрофные, М – мезотрофные. Сев. рям – слабо залесенные сосной с участием кедра сибирского олиготрофные кустарничково-(лишайниково)-сфагновые болота, замещающие в северной тайге рослый и типичный рям, которые распространены в подзонах южной и средней тайги.

Так на карте болот лесной зоны Западной Сибири, где торфяные болота покрывают около 50 % территории (Terentiev et al., 2016), рямы (сосново-кустарничково-сфагновые биогеоценозы) и рямовые гряды (bogs) занимают в северной, средней и южной тайге 24, 46 и 42% от всей площади болот в этих подзонах. На олиготрофные (омбротрофные) топи и мочажины (extremely poor fens) верховых болот приходится 43, 37 и 20 % соответственно. Бедные, умеренно богатые и богатые элементами минерального питания осоково-сфагновые и осоково-гипновые топи (fens) переходных и

низинных болот особенно заметны на юге лесной зоны, где они занимают до 35 % площади болот, в том время как в средней и северной тайге всего 8 и 7 %. Таким образом изучением углеродного баланса болотных экосистем Западной Сибири с большей или меньшей повторностью достаточно охватить 15-20 основных типов биогеоценозов, организовав определение запасов и мониторинг потоков парниковых газов и растворенного углерода на 5-6 стационарных полигонах, где будут представлены репрезентативные типы болот.

Предложенная классификация болот базируется на общих характеристиках ландшафтной структуры, растительности, условиях водно-минерального питания, что отражается в физиономическом облике болот. Кроме того, оказалось, что выделенные типы болот хорошо соотносятся и соответствуют основным флороценотическим комплексам болотных ландшафтов, установленных независимо по результатам статистической обработки описаний болотной растительности (Lapshina, 2003).

Мерзлые торфяные бугры, рямы и омбротрофные сфагновые топи связаны в своем развитии исключительно с атмосферными осадками крайне бедными элементами минерального питания. При этом они резко различаются по условиям увлажнения: от насыщенных водой топких сфагновых ковров и сплавин до относительно сухих условий рямов, бугров и гряд, где глубина залегания воды (мерзлоты) варьирует от 20 до 70 см.

Бедные осоково-моховые топи характеризуются смешанным питанием атмосферными и поверхностно-сточными водами с большим или меньшим участием грунтовых вод. Даже в случаях, где питание на верховых болотах осуществляется преимущественно атмосферными водами (мезоолиготрофные осоково-сфагновые топи), их слабая проточность обеспечивает более благоприятные условия минерального питания растений, что сказывается на продуктивности растительных сообществ и общем облике ландшафтов. В зависимости от доли участия в питании болот различных по богатству грунтовых вод выделяются осоково-болотнотравно-сфагновые и осоково-гипновые топи, хорошо отграниченные друг от друга и предыдущей группы по флористическому составу и набору растительных сообществ, но сходные по продуктивности.

Богатые осоково-гипновые топи получают дополнительное минеральное питание за счет выклинивания грунтовых вод нередко напорного характера, богатых карбонатами и другими обменными основаниями. Богатые гипновые топи резко выделяются среди всех других топей своим флористическим составом и локализацией в пределах речных долин.

Не все типы и подтипы торфяных болот представлены во всех биоклиматических зонах. В одних случаях это определяется исключительно климатическими факторами. Например, мерзлые торфяные бугры (*palsas*) в составе плоскобугристых комплексов являются характерной (неотъемлемой) чертой междуречных равнин и речных террас в южных тундрах и лесотундре. Они далеко проникают на север лесной зоны Западной Сибири, но полностью отсутствуют в средней и южной тайге. Наличие мерзлых бугров и мерзлых гряд является одним из наглядных дополнительных отличий между подзонами средней и северной тайги.

В других случаях отсутствие каких-либо типов болот в той или иной зоне (подзоне) объясняется главным образом геолого-литологическими причинами и историей развития территории и природы в голоцене и лишь косвенно обусловлено климатом преимущественно былых эпох. Так, например, в Западной Сибири развитие и распространение богатых осоково-гипновых топей в долинах рек и менее богатых осоково-гипновых топей на водоразделах в пределах южной тайги и подтайги обусловлено широким распространением в южной части Западно-Сибирской равнины карбонатных суглинков, перекрывающих обширные поверхности междуречных пространств и древних речных террас. Содержание карбонатов в почвообразующих породах уменьшается к северу по мере увеличения количества осадков. Соответственно осоково-гипновые болота практически полностью исчезают в средней и северной тайге и вновь появляются в виде умеренно богатых осоково-гипновых топей на болотах тундровой зоны как результат меньшей выщелоченности грунтов.

Типичные согры также развиваются в сравнительно богатых условиях минерального питания, как правило, безнапорными грунтовыми водами. Они наиболее характерны для южной тайги и подтайги, регулярно встречаются в средней тайге и постепенно исчезают в северной тайге.

Некоторые типы торфяных болот в направлении с юга на север замещаются иными близкими типами. Так, рослый рям и рям в их типичном виде характерны и широко распространены в подзонах южной и средней тайги. На севере в соответствующих условиях развиваются слабозалесенные сосной с участием кедра сибирского олиготрофные кустарничково-(лишайниково)-сфагновые болота,

получившие название северного рьяма. Они сходны по флористическому составу (если не считать более заметное участие напочвенных лишайников) с рослым рьямом в более южных подзонах тайги, но физиономически из-за низкорослого древостоя напоминающие среднетаежные рьямы.

В данной классификационной схеме не рассматриваются некоторые типы торфяных болот, занимающие везде крайне незначительные площади, например, ключевые болота. Такие типы болот не представляется возможным выявлять на обзорных космических снимках среднего масштаба, используя стандартные приемы дешифрирования, в силу их ограниченной площади.

Эта классификационная схема не включает также некоторые типы торфяных болот, занимающие сравнительно небольшие в Западной Сибири площади, например, безлесные олиготрофные кустарничково-сфагновые верховые болота (bogs) и мезоолиготрофные кустарничково-сфагновые и кустарничково-осоково-сфагновые гряды и ковры аапа болот, которые сочетаются с осоковыми и вахтово-осоковыми обводненными мочажинами со слабо развитым или отсутствующим моховым покровом.

Между тем аапа болота широко распространены в подзоне северной тайги, а кустарничково-сфагновые болота безлесные или с редким ярусом сосны – по всей лесной зоне европейской части России. Свои особенности имеют и болота Средней и Восточной Сибири и Дальнего Востока. Это связано с тем, что природные условия и набор биоклиматических зон меняется по мере изменения континентальности климата при продвижении с запада на восток (Shumilova, 1962; Ogureeva, 1991; Yurkovskaya, 2010), соответственно меняется физиономический облик болот, исчезают одни и появляются новые их типы. Для выявления основных типологических единиц болотных ландшафтов в масштабе всей страны необходимо составление классификационных схем обобщенных типов болот во всех других меридиональных секторах территории России: восточноевропейском, восточносибирском и дальневосточном.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации» № 123030300031-6 при финансовой поддержке гранта Правительства Тюменской области программы Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня (национальный проект «Наука»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Aleksandrova V.D. 1962. Aboveground and underground mass of plants in communities of different subzones of the Arctic. In: *Biological foundations of the use of nature of the North*, pp. 13-19, . Syktyvkar (in Russian). [Александрова В. Д. 1962. Надземная и подземная масса растений в сообществах разных подзон Арктики // Биологические основы использования природы Севера. Сыктывкар. С. 13-19.]

Aleksandrova V.D. 1971. Presentation of the draft unification of terms in the doctrine of the biosphere and biogeocenosis. In: *The next tasks of biogeocenology and the results of the work of biogeocenological field stations*, pp. 44-57, Part I, Leningrad (in Russian). [Александрова В.Д. 1971. Представление проекта унификации терминов в учении о биосфере и биогеоценозе // Очередные задачи биогеоценологии и итоги работ биогеоценологических стационаров. Ч. I, - Л.: Наука. С. 44-57.]

Bellen S. van, Larivière V. 2020. The ecosystem of peatland research: a bibliometric analysis. *Mires and peat*, 26 (15), 30. <https://doi.org/10.19189/MaP.2020.RSC.StA.1977>.

Berg L.S. 1945. Facies, geographical aspects and geographical zones. *News of the All-union Geographical Society*, 77(3): 162-164 (in Russian). [Берг Л.С. 1945. Фации, географические аспекты и географические зоны // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва. Т. 77. Вып. 3. С. 162-164.]

Boch M.S., Smagin V.A. 1993. *Flora and vegetation of the mire of the North-West of Russia and the principles of their protection*. Hydrometeoizdat, St. Petersburg. 225 pp. (in Russian). [Боч М.С., Смагин В.А. 1993. Флора и растительность болот Северо-Запада России и принципы их охраны. СПб: Гидрометеоздат. 225 с.]

Bogdanovskaja-Guihéneuf I.D. 1969. The patterns of oligotrophic peat bogs formation illustrated by the Polistovo-Lovatsk massif. *Nauka, Leningrad*. 186 pp. (in Russian). [Богдановская-Гиенэф И.Д. 1969. Закономерности формирования сфагновых болот верхового типа на примере Полистово-Ловатского массива. Л.: Наука. 186 с.]

- Bogdanowskaya-Guihéneuf I.D. 1946. About some basic issues of mire science. *Botanicheskiy zhurnal*, 31(2): 33-44 (in Russian). [Богдановская-Гиенэф И.Д. 1946. О некоторых основных вопросах болотоведения // Ботан. журн. Т. 31. № 2. С. 33-44.].
- Bolshoe Vasyuganskoe boloto (Big Vasyugan mire): Current state and development processes. 2002. (M.V. Kabanov ed.). *Publishing House of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS*, Tomsk. 230 pp. (in Russian). [Большое Васюганское болото: Современное состояние и процессы развития. 2002. / Под общ. ред. М. В. Кабанова. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СОРАН. 230 с.].
- Botch M.S., Mazing V.V. 1979. *Ecosystems of USSR mires*. Nauka, Leningrad, 187 pp. (in Russian). [Боч М.С., Мазинг В.В. 1979. Экосистемы болот СССР. Л.: Наука. 187 с.].
- Carbon regulation in the Russian Federation. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. 2023. 20 pp. (in Russian). [Углеродное регулирование в Российской Федерации. Министерство экономического развития РФ. 2023. 20 с.].
- Dreux Ph. 1976. *Ecology*. Atomizdat, Moscow. 168 pp. (in Russian). [Дрѐ Ф. Экология. 1976. Пер. с французского В.В. Алпатов. М.: Атомиздат, 165 с.].
- Duvigneaud P., Tanghe M. 1973. *Ecosystems and biosphere*. Progress, Moscow. 268 pp. (in Russian). [Дювиньо П., Танг М. 1973. Биосфера и место в ней человека: (Экологические системы и биосфера). Пер. с фр. П. М. Рафеса; Под ред. А. Н. Формозова; После сл. Ю. К. Ефремова. - Москва: Прогресс, 268 с.].
- Dylis N.V. 1969. *Forest biogeocenosis structure*. (Komarov Readings, XXI). Nauka, Moscow, 56 pp. (in Russian). [Дылис Н.В. 1969. Структура лесного биогеоценоза. (Комаровские чтения, XXI). М.: Наука. 56 с.].
- Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Lapshina E. 2021. The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia: The Mukhrino bog case study. *Land*, 10(8), 824. <https://doi.org/10.3390/land10080824>
- Elina G.A. 1968. *Vegetation, bog facies and development history of the southeastern Pribelomorje mires*. Abstract dis. cand. biol. sciences. Petrozavodsk. 25 pp. (in Russian). [Елина Г.А. 1968. Растительность, болотные фации и история развития болот юго-восточного Прибеломорья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск. 25 с.].
- Elina G.A. 1974. Types of mire massifs of Northern Karelia. In: *Types of mires of the USSR and the principles of their classification*, pp. 69-77, Nauka, Leningrad (in Russian). [Елина Г.А. 1974. Типы болотных массивов Северной Карелии // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука, С.69-77.].
- Eurola S., Hicks S., Kaakinen E. 1984. Key to Finnish mire types. In: *European mires*, pp. 11-117. London, 1.
- Galanina O.V. 2004. *Sphagnum bog vegetation and its mapping in the southwest taiga region*. Abstract dis. cand. biol. sciences. St. Petersburg. 26 pp. (in Russian). [Галанина О.В. 2004. Растительность сфагновых болот и ее картографирование на юго-западе таежной области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб. 26 с.].
- Galkina E.A. 1946. Mire landscapes and the principles of their classification. In: *Paper collection of the BIN of the USSR Academy of Sciences, performed in Leningrad for three years of World War II (1941-1943)*, pp. 139-156, Moscow; Leningrad (in Russian). [Галкина Е.А. Болотные ландшафты и принципы их классификации // Сборник работ БИН АН СССР, выполненных в Ленинграде за три года Великой Отечественной войны (1941-1943). М.: Л., 1946. С. 139-156].
- Galkina E.A. 1955. Mire landscapes of the forest area. *Geograficheskiy sbornik*, 7:75-84 (in Russian). [Галкина Е.А. 1955. Болотные ландшафты лесной зоны. Географический сборник. № 7. С. 75-84].
- Galkina E.A. 1959. Mire landscapes of Karelia and principles of their classification. In: *Torfyanye bolota Karelii. Peatlands of Karelia*, pp. 3-48, Gosizdat Karelskoy ASSR, Petrozavodsk (in Russian). [Галкина Е.А. 1959. Болотные ландшафты Карелии и принципы их классификации // Торфяные болота Карелии. Петрозаводск: Госиздат Карельской АССР. С. 3-48.].
- Galkina E.A. 1962. Features of mapping the vegetation covers of mires massifs. (Using aerial photography materials). Moscow-Leningrad. In: *Principles and methods of geobotanical mapping*, pp. 121-130, Moscow-Leningrad (in Russian). [Галкина Е.А. 1962. Особенности картирования растительного покрова болотных массивов. (С применением материалов аэрофотосъемки) // Принципы и методы геоботанического картографирования. Москва-Ленинград. С. 121-130].
- Galkina E.A. 1964. Methods of using aerial photographs for typing and mapping mire areas. In: *Mires and wetlands of Karelia*, pp. 5-24, Petrozavodsk (in Russian). [Галкина Е.А. Методы использования аэрофотоснимков для типизации и картирования болотных массивов // Болота и заболоченные земли Карелии. Петрозаводск. С. 5-24].
- Galkina E.A. 1966. Significance of aerial photography for the establishment of mire stratigraphic units. *Doklady komissii aeros'yomki i fotogrammetrii*, 2. Leningrad, Geograficheskoe obshchestvo SSSR, pp. 87-96. (in Russian). [Галкина Е.А. 1966. Значение аэрофотосъемки для установления болотных стратиграфических единиц // Доклады комиссии аэросъемки и фотограмметрии. Вып. 2. Л.: Географическое общество СССР. С. 87-96].
- Galkina E.A. 1984. Territorial units of peatlands and the approach to their classification. *Materials of the VII All-Union Workshop of Mire Science*. Kalinin, pp. 11-18. (in Russian). [Галкина Е.А. 1984. Территориальные единицы торфяников и подход к их классификации // Материалы VII Всесоюз. совещ. по болотоведению. Калинин. С. 11-18].
- Galkina E.A., Abramova T.G., Kiryushkin V.P. 1974. Principles of typology of mire massifs. In: *Types of mire of the USSR and the principles of their classification*, pp. 28-35, Nauka, Leningrad (in Russian). [Галкина Е.А., Абрамова Т.Г., Кирюшкин В.П. 1974. Принципы типологии болотных массивов // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука. С. 28-35].
- Glebov F.Z. 1969. *Mire and swampy forests in the forest zone of the Yenisei left bank*. Nauka, Moscow, 132 pp. (in Russian). [Глебов Ф.З. 1969. Болота и заболоченные леса лесной зоны Енисейского левобережья. М.: Наука. 132 с.].
- Glebov F.Z., Gorozhankina S.M., Kireev D.M., Karpenko L.V. 1978. Experience in studying the structure and genesis of forest-swamp complexes. In: *Features of forest-swamp ecosystems in Western Siberia*. Krasnoyarsk, pp. 14-95 (in Russian). [Глебов Ф.З., Горожанкина С.М., Киреев Д.М., Карпенко Л.В. 1978. Опыт изучения структуры и генезиса лесоболотных комплексов // Особенности лесоболотных экосистем Западной Сибири. Красноярск. С. 14-95].

- Goldin D.I. 1976. Development of drainage work in the Tomsk region. In: *Theory and practice of forest mire science and hydroforestry*, pp. 113-119, Krasnoyarsk (in Russian). [Гольдин Д.И. 1976. Развитие осушительных работ в Томской области // Теория и практика лесного болотоведения и гидроресомелиорации. Красноярск. С. 113–119].
- Golovatskaya E.A., Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. 2024. Greenhouse gas fluxes and carbon sequestration in the oligotrophic peat soils of southern taiga in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 57(2): 210-219. <https://doi.org/10.1134/S1064229323602871>
- Gounand I., Little C.J., Harvey E., Altermatt F. 2018. Cross-ecosystem carbon flows connecting ecosystems worldwide. *Nature Communications* 9(1): 4825. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07238-2>
- Ivanov I.K. (ed.) 1976. *Bogs of Western Siberia, their structure and hydrological regime*. Hydrometeoizdat, Leningrad. 447 pp.
- Ivchenko T.G. 2019. *Mire vegetation of the Southern Ural region (within the Chelyabinsk Province)*. Diss.... Dr. Biol. Sciences. St. Petersburg. 476 pp. (in Russian). [Ивченко Т. Г. 2019. Растительность болот Южно-Уральского региона (в пределах Челябинской области): Дисс. ... д-ра биол. наук. Санкт-Петербург. 476 с.].
- Kats N.Ya. 1941. *Mires and peatlands*. Uchpedgiz, Moscow, 400 pp. (in Russian). [Кац Н.Я. 1941. Болота и торфяники. М.: Учпедгиз. 399 с.].
- Kats N.Ya. 1948. *Mire types of the USSR and Western Europe and their geographical distribution*. Geographics, Moscow, 319 pp. (in Russian). [Кац Н.Я. 1948. Типы болот СССР и Западной Европы и их географическое распространение. М.: Географгиз. 319 с.].
- Kats N.Ya. 1971. *Mires of the world*. Nauka, Moscow, 295 pp. (in Russian). [Кац Н.Я. 1971. Болота земного шара. М.: Наука. 295 с.].
- Kaule G. 1976. Voraussetzungen und Massnahmen zur Erhaltung geschützter und schützenswerter Moore. *Telma* 6: 211-217.
- Korchagin A.A. 1976. Structure of plant communities. In: *Field geobotany. Issue 5*, pp. 7-320. Nauka, Leningrad (in Russian). [Корчагин А.А. 1976. Строение растительных сообществ // Полевая геоботаника. Л. Т. 5. С. 7-320].
- Kudeyarov V.N. 2015. The current state of the carbon balance and the ultimate ability of soils to absorb carbon in Russia. *Soil science*, 9: 1049-1049 (in Russian). [Кудеяров В.Н. 2015. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. № 9. С. 1049-1049]. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
- Kuznetsov O.L. 2023. Main directions and results of research by the Karelian school of mire science. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 3: 47-75. (in Russian). [Кузнецов О.Л. 2023. Основные направления и результаты исследований карельской научной школы болотоведения // Труды Карельского научного центра РАН. № 3. С. 47-75]. <https://doi.org/10.17076/eco1771>
- L'vov Yu.A. 1974. Methodical materials for the typology and classification of the Tomsk Province mires. In: *Mire types of the USSR and principles their classification*, pp. 188-194, Nauka, Leningrad (in Russian). [Львов Ю.А. 1974. Методические материалы к типологии и классификации болот Томской области // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука. С. 188-194].
- L'vov Yu.A. 1977. Peat bog as a system of bog facies. *Doklady vysshey shkoly. Biologicheskie nauki*, 9: 97-103 (in Russian). [Львов Ю.А. 1977. Торфяное болото как система болотных фаций // Докл. высш. школы. Биол. науки. № 9. С. 97-102].
- L'vov Yu.A. 1979. Biogeocenology. In: *Ecology, biogeocenology and nature protection* (B.G. Joganzen ed.). Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, Tomsk, pp. 96-172 (in Russian). [Львов Ю.А. 1979. Биогеоценология // Экология, биогеоценология и охрана природы / под ред. Б.Г. Иоганзена. Томск: Изд-во Том. ун-та. С. 96-172].
- L'vov Yu.A. 1995. Theoretical and methodological prerequisites for landscape environmental research. In: *Readings in memory of Yu.A. L'vov*, pp. 96-106, Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, Tomsk (in Russian). [Львов Ю.А. 1995. Теоретические и методологические предпосылки ландшафтно-экологических исследований // Чтения памяти Ю.А. Львова. Томск: Изд-во Том. ун-та. С. 96-106.].
- Lapshina E.D. 1987. *The structure and dynamics of the floodplain mires of the Ob River (in the south of the Tomsk Province)*: Dis. cand. biol. sciences. Tomsk, 282 pp. (in Russian). [Лапшина Е.Д. 1987. Структура и динамика болот поймы реки Оби (на юге Томской области): Дис. ... канд. биол. наук. Томск. 282 с.].
- Lapshina E.D. 2000. Biogeocenotic and landscape-ecological studies of the mire cover of the forest zone of Western Siberia. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 5: 599-606. (in Russian). [Лапшина Е.Д. Биогеоценологические и ландшафтно-экологические исследования болотного покрова лесной зоны Западной Сибири // Сиб. экол. журн. 2000. № 5. С. 599–606].
- Lapshina E.D. 2003. *Flora of mire in the southeast of Western Siberia*. Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, Tomsk, pp. 294 (in Russian). [Лапшина Е.Д. 2003. Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та. 294 с.].
- Lapshina E.D. 2004. *Peatlands of the southeast of Western Siberia (botanical diversity, history of development and dynamics of carbon accumulation in the Holocene)*: Dis. ... dr. biol. sciences. Tomsk, 436 pp. (in Russian). [Лапшина Е.Д. 2004. Болота юго-востока Западной Сибири (ботаническое разнообразие, история развития и динамика накопления углерода в голоцене): Дис. ... д-ра биол. наук. Томск. 436 с.].
- Lapshina E.D. 2010. *Vegetation of mire in the southeast of Western Siberia*. Izdatel'stvo Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta, Novosibirsk, 186 pp. (in Russian). [Лапшина Е.Д. 2010. Растительность болот юго-востока Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во НГУ. 186 с.].
- Lavrenko E.M. 1959 Plant community (phytocenosis) and plant relationships in it. In: *Field geobotany*, Issue 1, pp. 16-75. *Publishing House of the USSR Academy of Sciences*, Moscow (in Russian). [Лавренко Е. М. 1959. Растительное сообщество (фитоценоз) и взаимоотношения растений в нем // Полевая геоботаника. М.: Изд-во АН СССР. Т. 1. С. 16-75].
- Lindsay R. 2016. *Peatland Classification*. In: Finlayson, C., et al. *The Wetland Book*. Springer, Dordrecht. pp. 1515-1528.

Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. 2001. *Bog systems of Western Siberia and their nature conservation value* (V.B. Kuvaev, ed.), Grif i K°, Tula, 584 pp. (in Russian). [Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукa З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. 2001. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / под ред. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К°. 584 с.]

Liss O.L., Berezina N.A. 1981. *Mires of the West Siberian plain*. Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, Moscow, 204 pp. (in Russian). [Лисс О.Л., Березина Н.А. 1981. Болота Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та. 204 с.]

Loisel J., Gallego-Sala A.V., Amesbury M.J., Magnan G., Anshari G., Beilman D.W., Wu J. 2021. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature climate change*, 11(1): 70-77. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>

Lopatin V.D. 1949. Outline of the vegetation of the Gladkoe mire. *Uchenye zapiski Leningradskogo universiteta. Seriya geograficheskikh nauk*, 5 (104): 152-174. (in Russian). [Лопатин В.Д. 1949. Очерк растительности Гладкого болота // Учен. зап. ЛГУ. Сер. геогр. Наук. Вып. 5. № 104. С. 152-174].

Lopatin V.D. 1954. "Gladkoe" mire (peat deposit and bog facies). *Uchenye zapiski Leningradskogo universiteta. Seriya geograficheskikh nauk*, 9: 95-181. (in Russian). [Лопатин В.Д. 1954. «Гладкое» болото (торфяная залежь и болотные фации) // Уч. зап. Лен. ун-та. Сер. геогр. наук. № 9. С. 95-181].

Lopatin V.D. 1958. Microcomplexity of vegetation cover. *Message Sakhalin complex scientific-research Institute. Sib. dep. USSR Academy of Sciences*, Issue 6, Yuzhno-Sakhalinsk, 16 pp. (in Russian). [Лопатин В. Д. 1958. О микрокомплексности растительного покрова. Сообщ. Сахалинск. комплексн. научн.-иссл. инст. Сиб. отд. АН СССР. Вып. 6, Южно-Сахалинск. 16 с.]

Lourence M., Fitchett J.M., Woodborne S. 2023. Peat definitions: A critical review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47(4): 506-520. <https://doi.org/10.1177/03091333221118353>

Mahdavi S., Salehi B., Granger J., Amani M., Brisco B., Huang W. 2018. Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review. *GIScience & remote sensing*, 55(5): 623-658. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1419602>

Masing V.V. 1969. *Theoretical and methodological issues in studying vegetation structure*. A report on published works submitted for defense instead of a dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences, Tartu, 96 pp. (in Russian). [Мазинг В.В. 1969. Теоретические и методические проблемы изучения структуры растительности. Доклад по опубликованным работам, представляемым к защите вместо дис. на соиск. учен. степ. доктора биол. наук. Тарту, 96 с.]

Masing V.V. 1974. Actual problems of classification and terminology in mire science. In: *Types of mire of the USSR and the principles of their classification*, pp. 6-12, Nauka, Leningrad (in Russian). [Мазинг В.В. 1974. Актуальные проблемы классификации и терминологии в болотоведении // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука. С. 6–12.]

Masing V.V. 1988. Structural levels of vegetation cover. *Uchenye zapiski Tartuskogo Universiteta*, 812: 122-141 (in Russian). [Мазинг В.В. 1988. Структурные уровни растительного покрова // Уч. зап. Тартуск. ун-та. Вып. 812. С. 122-141].

Masing V.V. 1993. Diversity of objects and multiple classifications of vegetation in mire science. In: *Issues of classification of mire vegetation*, pp. 13-19, Nauka, St. Petersburg (in Russian). [Мазинг В.В. 1993. Разнокачественность объектов и множественность классификаций растительности в болотоведении // Вопросы классификации болотной растительности. СПб.: Наука. С. 13-19.]

Masing V.V. 1994. Structural organization of mires. *Chteniya pamyati V.N. Sukachyova: XI. Biogeotsenoticheskiye osobennosti bolot i ikh ratsional'noye ispol'zovaniye*. Nauka, Moscow, pp. 38–60 (in Russian) [Мазинг В.В. Структурная организация болот // Биogeоценоотические особенности болот и их рациональное использование. Чтения памяти академика В.Н. Сукачева. М.: Наука, 1994. С. 38-60].

Minasny B., Berglund Ö., Connolly J., Hedley C., de Vries F., Gimona A., Kempen B., Kidd D., Lilja H., Malone B., McBratney A., Roudier P., O'Rourke Sh., Rudiyanto, Padarian J., Poggio L., Caten ten A., Thompson D., Tuve C., Widyatmanti W. 2019. Digital mapping of peatlands. A critical review. *Earth-Science Reviews*, 196, pp. 102870. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.014>

Minayeva T.Yu., Sirin A.A. 2012. Peatland Biodiversity and Climate Change. *Biology Bulletin Reviews*, 2(2): 164-175 (in Russian). [Минаева, Сирин. Биоразнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011. Т.131. № 4. С. 393-406].

Mires and peatlands of Europe. Status, distribution and conservation. 2017. Ed.: Joosten H., Tanneberger F., Moen A. 780 pp.

Nitsenko A.A. 1967. On the terminology of the basic concepts of mire science. *Botanicheskii Zhurnal*, 52(11): 1692-1696 (in Russian). [Ниценко А.А. 1967. О терминологии основных понятий болотоведения // Ботан. журн. Т. 52. № 11. С. 1692-1696.]

Ogureeva G.N. 1991. *Botanical and geographical zoning of the USSR*. Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, Moscow, 80 pp. (in Russian). [Огуреева Г.Н. 1991. Ботанико-географическое районирование СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та. 80 с.]

P'yavchenko N.I. 1958. *Peatlands of the Russian forest-steppe*. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 191 pp. (in Russian). [Пьявченко Н.И. 1958. Торфяники русской лесостепи. М.: Изд-во АН СССР. 191 с.]

P'yavchenko N.I. 1963. *Forest mire science*. Izdatel'stvo AN SSSR Moscow, 192 pp. (in Russian). [Пьявченко Н.И. 1963. Лесное болотоведение. М.: АН СССР. 192 с.]

P'yavchenko N.I. 1972. On the study of mire biogeocenoses. In: *Main principles of mire biogeocenoses study*, pp. 5-13, Nauka, Leningrad (in Russian). [Пьявченко Н.И. 1972. Об изучении болотных биogeоценозов // Основные принципы изучения болотных биogeоценозов. Л.: Наука. С. 5-13.]

- P'yavchenko N.I. 1985. Peat bogs, their natural and economic importance. Nauka, Moscow, 152 pp. (in Russian). [Пьявченко Н.И. 1985. Торфяные болота их природное и хозяйственное значение. М.: Наука. 152 с.]
- Prozorgov Yu.S. 1974. Mire of the Lower Amur lowlands. Nauka, Novosibirsk, 209 pp. (in Russian). [Прозоров Ю.С. 1974. Болота нижнеамурских низменностей. Новосибирск: Наука. 209 с.]
- Qiu C., Zhu D., Ciais P., Guenet B., Peng S. 2020. The role of northern peatlands in the global carbon cycle for the 21st century. *Global Ecology and Biogeography*, 29(5): 956-973. <https://doi.org/10.1111/geb.13081>
- Ramenskiy L.G., Czaczenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipov N.A. 1956. Ecological assessment of forage land by vegetation cover. Selkhozgiz, Moscow, 472 pp. (in Russian). [Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипов Н.А. 1956. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз. 472 с.]
- Razvedka torfyanyh mestorozhdenij (Peat Exploration). 1953. Moscow, 705 pp. (in Russian). [Разведка торфяных месторождений. 1953. М. 705 с.]
- Romanova E.A. 1964. Types of mire microlandscapes as indicators of peat types in the upper layers of peat deposits of minerotrophic fens. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*, 112: 54-81 (in Russian). [Романова Е.А. 1964. Типы болотных микроландшафтов как показатели видов торфа в верхних слоях торфяной залежи низинных болот // Тр. гос. гидр. ин-та. Вып. 112. С. 54-81].
- Romanova E.A. 1974. Types of mire massifs and patterns of their distribution in Western Siberia. In: *Mire types of the USSR and the principles of their classification*, pp. 167-174, Nauka, Leningrad (in Russian). [Романова Е.А. 1974. Типы болотных массивов и закономерности распределения их на территории Западной Сибири // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука. С. 167-174].
- Romanova E.A. 1976. Common characteristics of bog landscapes. In: *Bogs of Western Siberia, their structure and hydrological regime*, pp. 19-39, Hydrometeoizdat, Leningrad (in Russian). [Романова Е.А. 1976. Общая характеристика болотных ландшафтов // Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим. Л.: Гидрометеоздат. С. 19-39].
- Rubtsov N.I. 1974. Landscape classifications of mire based on terrain features. In: *Mire types of the USSR and the principles of their classification*, pp. 44-50, Nauka, Leningrad (in Russian). [Рубцов Н.И. 1974. Ландшафтные классификации болот на основе признаков рельефа // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука. С. 44-50].
- Semenova N.M., Lapshina E.D. 2001. Description of the West Siberian Plain. In: *Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands*, (W. Bleuten, E. Lapshina, eds.), pp. 10-22, Utrecht, Tomsk.
- Shennikov A.P. 1964. *Introduction to geobotany*. Izdatel'stvo Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta, Leningrad, 447 pp. (in Russian). [Шенников А.П. 1964. Введение в геоботанику. Л.: Изд-во ЛГУ. 447 с.]
- Shirov A.A. 2023. Creation of a system for monitoring and forecasting emissions of climatically active substances in the interests of modernization and development of the Russian economy. *Prediction Problems*, 6: 11-24 (in Russian). [Широв А.А. 2023. Создание системы мониторинга и прогнозирования выбросов климатически активных веществ в интересах модернизации и развития экономики России. Проблемы прогнозирования. № 6. С. 11-24]. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-11-24>
- Shumilova L.V. 1962. *Botanical geography of Siberia*. Izdatel'stvo Tomskogo Universiteta, Tomsk, 440 pp. (in Russian). [Шумилова Л.В. 1962. Ботаническая география Сибири. Томск: Изд-во Том. ун-та. 440 с.]
- Shvarts S.S. 1973. Evolution and biosphere. In: *Problems of biogeocenology*, pp. 213-228, Nauka, Moscow (in Russian). [Шварц С.С. 1973. Эволюция и биосфера // Проблемы биогеоценологии. М.: Наука. С. 213-228].
- Sjörs H. 1950. Regional studies in North Swedish mire vegetation. *Bot. Notiser* 1950: 173-222.
- Solntsev N.A. 1949. About the morphology of the natural geographical landscape. *Voprosy geografii*, 16: 61-86 (in Russian). [Солнцев Н.А. 1949. О морфологии природного географического ландшафта // Вопросы географии. Вып. 16. С. 61-86].
- Sukachev V.N. 1964. Basic concepts of forest biocenology. Fundamentals of forest biocenology. Nauka, Moscow, 573 pp. (in Russian). [Сукачев В. Н. 1964. Основные понятия лесной биоценологии. Основы лесной биоценологии. М.: Наука. 573 с.]
- Sukachev V.N. 1972. *Fundamentals of forest typology and biogeocenology*, Selected works. Issue 1, 418 pp, Nauka, Leningrad (in Russian). [Сукачев В.Н. Избранные труды. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. Т. 1. 418 с.]
- Sukachev V.N. 1973. Mire, their formation, development and properties. Selected works. Issue 2. Problems of mire science, paleobotany and paleogeography. Nauka, Leningrad, 97-188 pp. (in Russian). [Сукачев В.Н. 1973. Болота, их образование, развитие и свойства // Избранные труды. Т. 2. Проблемы болотоведения, палеоботаники и палеогеографии. Л.: Наука. С. 97-188].
- Sukachev V.N. 1975. Problems of phytocenology. Selected works. Issues 3 (E.M. Lavrenko, ed.), 543 pp. (in Russian). [Сукачев В.Н. 1975. Избранные труды в трёх томах / под ред. Е.М. Лавренко. Т. 3. Проблемы фитоценологии. 543 с.]
- Tanneberger F., Moen A., Barthelmes A., Lewis E., Miles L., Sirin A., Tegetmeyer C., Joosten H. 2021. Mires in Europe. Regional diversity, condition and protection. *Diversity*, 13(8): 381 <https://doi.org/10.3390/d13080381>
- Terentieva I.E., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Sabrekov A.F., Maksyutov S. 2016. Mapping of West Siberian taiga wetland complexes using Landsat imagery: implications for methane emissions. *Biogeosciences*, 13(16): 4615-4626. <https://doi.org/10.5194/bg-13-4615-2016>
- The Water Code of the Russian Federation №. 74-FZ dated June 3, 2006 (as amended on 25.12.2023), Moscow, Kremlin, 42 p. (in Russian). [Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. N 74-ФЗ (ред. от 25.12.2023), Москва, Кремль, 42 с.]
- Titlyanova A.A. 1976. The concept of biogeocenotic processes. In: *Structure, functioning and evolution of biosystems of Baraba geocenoses*, pp. 449-467, Nauka, Novosibirsk (in Russian). [Титлянова А.А. 1976. Понятие биогеоценологических

процессов. В сб.: Структура, функционирование и эволюция систем биогеоценозов Барабы. Новосибирск: Наука. С. 449-467].

Tsinzerling Yu. D. 1938. Mire vegetation. In: *Vegetation in the USSR*. Vol. 1. Izdatel'stvo AN SSSR Moscow-Leningrad, 355-428 pp. (in Russian). [Цинзерлинг Ю.Д. 1938. Растительность болот СССР // Растительность СССР. М.; Л., Т. 1. С. 355-428].

Tyuremnov S.N. 1957. Vegetation cover. In: *Peat deposits of West Siberia*, pp. 30-39, Nedra, Moscow (in Russian). [Тюремнов С.Н. 1957. Растительный покров // Торфяные месторождения Западной Сибири. М.: Недра. С. 30-39].

Usova L.I. 2009. *A practical guide to landscape decoding of aerial photographs of various mire types in Western Siberia*, Nestor-Istoria, St. Petersburg, 80 pp. (in Russian). [Усова Л.И. 2009. Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. СПб.: Нестор-История. 80 с.].

Vinogradova E.A. 1957. Geomorphological types of peat deposits. In: *Peat deposits of Western Siberia*. Nedra, Moscow, 97-114 pp. (in Russian). [Виноградова Е.А. 1957. Геоморфологические типы торфяных месторождений // Торфяные месторождения Западной Сибири. М.: Недра. С.97-114].

Vitt D. H., Short P. 2020. Peatlands. In: *Wetlands and Habitats*, pp. 27-36, CRC Press.

Volkova E.M. 2018. *Mire of the Central Russian Upland: genesis, structural and functional features and environmental significance*: Dis. Dr. biol. sciences. Tula. 453 pp. (in Russian). [Волкова Е.М. 2018. Болота Среднерусской возвышенности: генезис, структурно-функциональные особенности и природоохранное значение: Дис. ... д-ра биол. наук. Тула. 453 с.].

Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A. 2011. Estimation of forest cover extent over peatlands and paludified shallow-peat lands in Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 4: 734-741. <https://doi.org/10.1134/S1995425511070058>

Warner B.G., Rubec C.D.A. (eds.). 1997. *The Canadian Wetland Classification System*, 2nd Edition. National Wetlands Working Group, Wetlands Research Centre, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada. 68 pp.

Wells DE, Zoltai S. 1985. Canadian system of wetland classification and its application to circumboreal wetlands. *Aquil. Ser. Bot.* 21: 45-52. <https://doi.org/10.1007/BF00045195>

Wetlands in Russia. 2000. 2. Important peatlands. In: *Wetlands International Global* (Botch M.S., ed.), Issues 2, Moscow. 91 pp.

Yang H., Chae J., Yang A.R., Suwignyo R.A., Choi E. 2023. Trends of Peatland Research Based on Topic Modeling: Toward Sustainable Management under Climate Change. *Forests*, 14(9): 1818. <https://doi.org/10.3390/f14091818>

Yaroshenko P.D. 1961. Geobotany. Basic concepts, directions and methods. Nauka, Moscow, Leningrad, 474 pp. (in Russian). [Ярошенко П.Д. 1961. Геоботаника. Основные понятия, направления и методы. М.; Л.: Наука., 474 с.].

Yu Z., Loisel J., Brosseau D.P., Beilman D.W., Hunt S.J. 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L13402. <https://doi.org/10.1029/2010GL043584>

Yurkovskaya T.K. 1969. On undulating-plain mire systems in northern Karelia. *Botanicheskii Zhurnal*, 54(5): 706-711. (in Russian). [Юрковская Т. К. 1969. О болотных системах волнистых равнин северной Карелии // Ботанический журнал. 1969. Т. 54, № 5. С. 706-711].

Yurkovskaya T.K. 1974. Types of mire areas on the overview map of the vegetation cover of the forest zone of the European part of the USSR. In: *Mire types of the USSR and the principles of their classification*, pp. 57-62, Nauka, Leningrad (in Russian). [Юрковская Т.К. 1974. Типы болотных массивов на обзорной карте растительного покрова лесной зоны европейской части СССР // Типы болот СССР и принципы их классификации. Л.: Наука. С. 57-62].

Yurkovskaya T.K. 1975. Geography of vegetation cover of types of mire massifs of the European part of the USSR. *Botanicheskii Zhurnal*, 60(9): 1251-1264 (in Russian). [Юрковская Т.К. 1975. География растительного покрова типов болотных массивов европейской части СССР // Ботан. журн. Т. 60. № 9. С. 1251-1264].

Yurkovskaya T.K. 1988. Vegetation mapping of mire systems. *Geobotanical mapping*. Nauka, Leningrad. pp. 13-28. [Юрковская Т.К. 1988. Картографирование растительности болотных систем // Геоботаническое картографирование. Ленинград, Наука. С. 13-28].

Yurkovskaya T.K. 1992. *Geography and cartography of mire vegetation in European Russia and adjacent territories*. BIN RAN, St. Petersburg: 256 pp. (in Russian). [Юрковская Т.К. 1992. География и картография растительности болот Европейской России и сопредельных территорий. СПб.: БИНРАН. 256 с.].

Yurkovskaya T.K. 2010. Meridional zoning and latitudinal differentiation of mire vegetation. In: *Russia's mires research directions in modern mires science of Russia*, pp. 165-178, St. Petersburg (in Russian). [Меридиональная зональность и широтная дифференциация растительности болот России // Направления исследований в современном болотоведении России. Санкт-Петербург. С. 165-178].

Приложение. ТИПОЛОГИЯ БОЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Таблица П1. Сравнительная характеристика болотных зон Западной Сибири (по Е.А. Романовой, 1976 с дополнениями).

Болотные зоны	Зональные типы болот и их растительность	Общая площадь болот (%)	Мощность торфа (м) <u>типично</u> <u>редко</u>	Гидрологическая зона Осадки/ поверхностный сток /испарение (мм год ⁻¹)	Минеральные грунты
Полигональных болот	Полигонально-валиковые комплексы с осоково-пушицевыми полигонами и кустарничковыми группировками на валиках	40–50	<u>0,1–0,5</u> 1,0–1,5 (3,0)	Избыточного увлажнения 480/250/230	мерзлые
Бугристых болот (северная часть)	Плоскобугристые болота с кустарничково-лишайниково-сфагновыми сообществами на буграх и осоково-гипново-сфагновыми в мочажинах	50	<u>0,25–0,30</u> (на буграх) <u>1,5–2,5</u> (в мочажинах) 2,5–4,0	Избыточного увлажнения 550/260/290	преимущественно мерзлые
Бугристых болот (южная часть)	Крупнобугристые болота с кустарничково-лишайниково-сфагновыми буграми и осоково-пушицево-сфагновыми топиями и мочажинами	>50	<u>1,0–2,5</u> 4,0–5,0	Избыточного увлажнения 600/280/320	локально мерзлые
Выпуклых олиготрофных (сфагновых) болот	Грядово-озерковые и грядово-мочажинные комплексы с сосново-кустарничково-сфагновыми грядами и осоково-сфагновыми мочажинами	40–60 и более	<u>3,5–4,0</u> 6,0–7,0 (10,0)	Избыточного увлажнения 590/200/390	Талые
Плоских ев- и мезотрофных (осоково-гипновых и лесных) болот	Осоково-гипновые и лесные топи в сочетании с олиготрофными сосново-кустарничково-сфагновыми и переходными болотами	20	<u>2,0–3,0</u> 5,0–7,0 в рядах	Переменного увлажнения 510/190/420	Талые
Вогнутых евтрофных (осоково-тростниковых) и засоленных (травяных) болот	Осоково-тростниковые «займища» с островами сосново-кустарничково-сфагновых рямов	5 (до 25 в северной части)	1,0–1,5	Недостаточного увлажнения 390/<10/380	Засоленные

Таблица П2. Ландшафтно-гидрологические типы болот лесной зоны Западной Сибири.

<p>ТОПОГЕННЫЕ БОЛОТА (TOPOGENOUS PEATLANDS) Болотные ландшафты, в которых высокий уровень вод поддерживается вследствие затрудненного дренажа поступающих в болото вод. Источником водного питания могут служить атмосферные осадки, поверхностно-сточные воды, полые воды реки и грунтовые воды. Затрудненный дренаж вызывается, как правило, топографическими причинами (расположением болотного массива в депрессиях рельефа), но может также быть обусловлен высоким уровнем стояния воды в реке или на прилегающих суходолах, вследствие высокого уровня грунтовых вод (непроницаемость почв, отсутствие стока, превышение осадков над испарением).</p>	
<p>БОЛОТАРЕЧНОГО ПИТАНИЯ</p>	
<p>БОЛОТА АЛЛЮВИАЛЬНО-РЕЧНОГО ПИТАНИЯ (ALLUVIAL PEATLANDS) – обеспечиваются влагой за счет более или менее регулярного заливания полыми водами. В типичном виде они представлены только в пределах центральных частей пойм крупных рек, полностью изолированных от склонов террас протоками и минеральными гривами. Нередко они развиваются в виде более или менее широкой полосы, окаймляя по периферии со стороны реки притеррасные болота высокой поймы (древних меандр) или залегают в притеррасной пойме в условиях регулярного заливания аллювиальными водами речных проток.</p>	
<p><i>Торфянистые луга</i></p>	<p>Высоко продуктивные осоково-вейниково-тростниковые гидроморфные луга в обширных плоских депрессиях низких уровней пойм крупных рек с постоянно высоким уровнем воды у поверхности почвы или несколько выше; поверхность более или менее ровная.</p>
<p><i>Аллювиальные кочкарноосочники</i></p>	<p>Занимают низкие уровни пойм с резко выраженной сезонной флуктуацией уровня воды. Полые воды застаиваются здесь длительное время, не имея стока, снижаясь до уровня межкочий лишь к концу вегетационного сезона; поверхность резко кочковатая.</p>
<p><i>Подпорно-аллювиально-болотные согры</i></p>	<p>Развиваются по обращенной к реке периферии крупных притеррасных болот; подвергаются более или менее регулярному воздействию полых вод реки при мощном влиянии влаги, стекающей с поверхности всего болотного массива.</p>
<p><i>Слабо аллювиальные пойменные согры</i></p>	<p>Развиваются более или менее широкими полосами вдоль русел малых рек и ручьев, стекающих с заболоченных водосборов и несущих сравнительно небольшое количество взвешенного аллювия. Питаются грунтовыми, речными и поверхностно-сточными водами.</p>
<p><i>Вторично-прирусловые согры</i></p>	<p>Бывшие лесные болота – согры, сформировавшиеся в притеррасных понижениях на сравнительно глубоком древесном торфе. В результате смещения русла вторично оказавшиеся в зоне прямого влияния реки; регулярно заливаются, но на короткий срок полыми водами.</p>
<p>БОЛОТАГРУНТОВОГО ПИТАНИЯ</p>	
<p>БОЛОТА ПРОТОЧНО-ГРУНТОВОГО ПИТАНИЯ (PERCOLATING PEATLANDS) – болота со слегка выраженным уклоном поверхности в сторону реки, питаемые грунтовыми водами, выклинивающимися из-под минерального берега непосредственно в торфяную залежь; широко распространены в пределах древних меандр под крутыми склонами высоких террас и глубоко врезанных долинах малых рек.</p>	
<p><i>Притеррасные лесные болота (притеррасные согры)</i></p>	<p>Болота лесного облика на более или менее плотном торфе, питаются напорными и безнапорными грунтовыми водами, выклинивающимися из-под террас; движение воды ограничено верхним слоем торфяной залежи.</p>
<p><i>Открытые и слабо залесенные притеррасные топи</i></p>	<p>Преимущественно открытые или слабо залесенные болота с насыщенной водой рыхлой торфяной залежью, нередко сплавинного типа; питаются грунтовыми, напорными водами; движение воды осуществляется через большую часть залежи.</p>
<p><i>Притеррасный веретьевый комплекс в вершинах меандр</i></p>	<p>Располагаются на едва заметных склонах притеррасных болот; выделяются ясно выраженным рисунком из низких параллельных или пересекающихся гряд («веретий»), ориентированных в общих чертах поперек уклона поверхности болота.</p>

<p>БОЛОТА ЗАСТОЙНО-ГРУНТОВОГО ПИТАНИЯ (SUMP PEATLANDS) – болота с плоской или слегка вогнутой поверхностью, залегающие обычно в разнообразных по форме и размерам депрессиях рельефа (плоских западинах и более глубоких котловинах), где высокий уровень застойных болотных вод поддерживается в течение всего года или только в первую половину вегетационного сезона. Основным источниками водного питания являются грунтовые воды. В первую половину лета заметную роль играют талые снеговые поверхностно-сточные воды.</p>	
<i>Сезонно застойно-топяные</i>	Преимущественно мелко контурные болота, залегающие в плоских депрессиях рельефа (суффозионных западинах); характеризуются резко переменным режимом увлажнения, за счет застоя талых снеговых и почвенно-грунтовых вод; к концу лета и в сухие годы подсыхают.
<i>Длительно застойно-топяные</i>	Топяные болота на относительно плотном торфе и слабой вертикальной подвижностью поверхности, характеризуется значительными флуктуациями уровня воды и бедностью бриофитами.
<i>Сплавинно застойно-топяные</i>	Топяные болота с рыхлой насыщенной водой или сплавинного типа торфяной залежью с высокой вертикальной мобильностью поверхности; характеризуется постоянством уровня воды в течение вегетационного сезона и хорошо развитым моховым ярусом.
<p>БОЛОТА СМЕШАННОГО ПИТАНИЯ</p>	
<p>БОЛОТА ТОРФЯНО-ПОВЕРХНОСТНО-СТОЧНОГО ПИТАНИЯ (RUN-OFF PEATLANDS) – нередко обширные по площади болота, питающиеся преимущественно торфяно-болотными и поверхностно-сточными водами, стекающими с болот, расположенных на более высоких уровнях рельефа.</p>	
<i>Неограниченные мелкозалежные болота</i>	Более или менее обширные полосы (стадия) современного заболачивания зональных лесов по границе между верховыми водораздельными болотами и суходольными лесами склонов междуречных пространств с мощностью торфяной залежи менее 1 м; обычно слабо отграничены от сезонно переувлажненных и заболоченных лесов на минеральных почвах.
<i>Лесные болота (согры) по окраинам выпуклых болот</i>	Лесные болота (согры) простираются более или менее широкими полосами по окраинам верховых и переходных болот водораздельных равнин.
<i>Периферийные (краевые) топи выпуклых болот (laggs)</i>	Обводненные топи, развивающиеся по периферии крупных или более мелких выпуклых верховых болот на контакте их с примыкающим склоном минерального берега; питаются за счет поверхностно-сточных вод стекающих с болота и суходола; по ним осуществляется сброс болотных вод, нередко сток слабо выражен или отсутствует.
<i>Топи выклинивания</i>	Обширные низинные топи в окружении олиготрофных верховых массивов, связанные с выклиниванием грунтовых вод в торфяную залежь или первичные болотные озера в пределах крупных болотных систем.
<i>Веретьевые комплексы склонов водораздельных болот</i>	Обширные низинные топи комплексного строения. Наиболее обычны для южного макросклона междуречья Оби и Иртыша на юге лесной зоны Западной Сибири; характеризуется узкими, низкими грядами (веретьями), ориентированными поперек уклона поверхности либо образующие кольцевидные структуры в виде ячеек сети.
<i>Анапа комплексы</i>	Участки крупных болотных систем со слабо вогнутой поверхностью и латеральным движением болотных вод; ассоциируются с едва наклонными, вытянутыми понижениями поверхности болот, где вторичные озера и мочажины чередуются с узкими грядами, ориентированными поперек основного направления стока болотных вод.
<i>Водосборные топи</i>	Располагаются в нижней части первичных водосборов в пределах крупных болотных систем; питаются главным образом торфяно-болотными и поверхностно-сточными водами, поступающими с прилегающих участков болот; характеризуются слабо проточным режимом увлажнения и сопряжены с истоками вытекающих из болот ручьев.
<i>Транзитные топи</i>	Внутриболотные водотоки (soak ways), по которым осуществляется сброс избыточных болотных вод с поверхности болотных массивов в речную сеть.

СОЛИГЕННЫЕ БОЛОТА (SOLIGENOUS PEATLANDS) – сравнительно редкий тип торфяных болот; встречается в основании относительно крутых склонов древних террас Томи и Оби, а также вдоль склонов глубоко врезаемых долин малых рек и ручьев в пределах предгорных полого-наклонных равнин вдоль юго-восточной окраины Западной Сибири, где постоянно выклинивающиеся грунтовые воды создают переувлажнение поверхности. Эти болота имеют, как правило, маломощный пласт торфа; грунтовые воды выклиниваются непосредственно в торфяную залежь либо стекают по поверхности.	
БОЛОТА КЛЮЧЕВОГО ПИТАНИЯ (SPRING-FED PEATLANDS)– солигенные болота, орошаемые главным образом за счет выклинивания грунтовых вод в виде ключей либо просачивания на поверхность или непосредственно в торфяную залежь.	
Открытые ключевые болота	Поверхность наклонная, нередко слабо вогнутая, примыкающая к основанию склонов; обычно наблюдаются выходы ключей и дренирующие ручейки на поверхности.
Ключевые болота лесного облика	Ключевые болота лесного облика развиваются в местах активного просачивания грунтовых вод; поверхность слегка наклонная, ассоциируются по днищам глубоких логов, истоками и верхними частями глубоко врезаемых долин ручьев.

ОМБРОГЕННЫЕ БОЛОТА (OMBROGENOUS PEATLANDS) – болотные массивы или их части, поверхность которых сохраняется во влажном состоянии, прежде всего за счет поступления достаточно большого количества осадков наряду с исключительно высокой водоудерживающей способностью. Болота этого типа имеют более или менее выпуклую форму поверхности; уровень воды стоит на поверхности или ниже нее и возвышается над окружающими суходолами и минеротрофными топиями.	
Рослый рям	Верховое болото лесного облика (h древостоя <i>Pinus sylvestris</i> f. <i>uliginosa</i> – 6-12 м) с плоской или слегка выпуклой формой поверхности, образованной сплошным ковром <i>Sphagnum angustifolium</i> , <i>S. divinum</i> ; питается атмосферными осадками, развиваясь, как правило, на неглубокой (до 1,5 м) торфяной залежи, периодически обсыхающей в сухие периоды лет.
Рям	Характерный и широко распространенный тип омбротрофных болот. Отличается округлыми очертаниями, выпуклой формой сравнительно хорошо дренированной поверхности, образованной <i>Sphagnum fuscum</i> и гомогенным растительным покровом (h древостоя (0.5)3-4 м); встречается в виде отдельных массивов в различного рода депрессиях рельефа или в пределах обширных болотных систем в сочетании с другими типами омбротрофных болот.
Рямово-мочажинный комплекс	Омбротрофный комплекс с мелкими или средних размеров мочажинами в окружении ряма, определяющего внешний облик ландшафта; мочажины не ориентированы либо создают характерную «лучевую» структуру ряма, располагаясь по линиям стекания.
Рямово-озерковый комплекс	Омбротрофный комплекс с многочисленными вторичными более или менее крупными озерами, окруженными топкими сфагновыми сплавидами; элементы комплекса не ориентированы; наиболее часто развивается в центральной плоской части водораздельных болот.
Грядово-мочажинный комплекс	Омбротрофный комплекс сосново-кустарничково-сфагновых (рямовых) гряд и топких сфагновых мочажин, ориентированных под прямым углом к направлению стока; конфигурация и размеры гряд и мочажин варьируют в широких пределах в зависимости от уклона поверхности болота. Различают грядово-мелко-, средне- и крупно-мочажинный варианты комплекса.
Грядово-мочажинно-озерковый комплекс	Омброгенный комплекс, характеризующийся развитием в обширных мочажинах более или менее крупных вторичных озерков; нередко могут присутствовать сравнительно большие и глубокие (до 3-4 м) озера; элементы комплекса ориентированы поперек уклона поверхности; обычно отмечается полосами в центральной части крупных водораздельных болот вдоль линий стекания.
Грядово-сплавинно-топяной комплекс	Топяной вариант омбротрофных комплексов. Обычно занимает обширные площади в центральной плоской части водораздельных болот; характеризуется рыхлой, насыщенной водой или сплавинного типа торфяной залежью; гряды на более плотном торфе занимают не более 10-15% площади комплекса.

Таблица ПЗ. Разнообразие основных типов болотных микроландшафтов (болотных фаций), выявленных на торфяных болотах лесной зоны Западной Сибири.

Физиономический облик	Марши	Лесные болота (согры)			Открытые и слабо залесенные осоково-моховые топи			С-куст-сфагн.
Богатство основаниями	Богатые	Богатые	Умерен. бедные	Богатые	Умерен. бедные	Бедные	Экстремально бедные	
Ступени богатства*	10-13	7-9	4-6	7-9	4-6	3-4	1-3	
Кислотность	Нейтральные	Суб-нейтр./основн.	Слабо-кислые	Суб-нейтр./основн.	Слабо-кислые	Кислые	Экстремально кислые	
Трофность	эвтрофные	мезотрофные			олиготрофные			
Ландшафтно-гидрологические элементы:								
ТОПОГЕННЫЕ БОЛОТА								
Речного питания:								
Торфянистые луга	+							
Аллювиальные кочкарники	+	+						
Вторично-прирусловые		+	+					
Подпорно-болотные согры		+	+					
Слабо аллювиальные согры		+	+					
Грунтового питания:								
Проточно-грунтового питания:								
Притеррасные согры			+					
Открытые притеррасные				+				
Веретьевые комплексы				+				
Застойно-грунтового питания:								
Диффузно мелкозалежные		+	+	+			+	
Сезонно застойные		+	+	+				
Длительно застойные	+				+	+	+	
Сплавинно топяные:					+	+	+	
Смешанного питания:								
Болота торфяно-поверхностно-сточного питания:								
Склоновые согры			+	+				
Топи выклинивания					+	+		
Веретьевые комплексы						+		
Аапа комплексы						+	+	
Водосборные топи («галыи»)						+	+	
Периферийные топи (Lagg)						+	+	
Транзитные топи						+	+	
Болота проточно-поверхностно-сточного питания:								
Подтопляемая кайма			+	+				
Сплавинно-проточные топи						+	+	
СОЛИГЕННЫЕ БОЛОТА								
Болота ключевого питания:								
Согры ключевого питания			+					
Открытые ключевые топи	+				+			
ОМБРОГЕННЫЕ БОЛОТА								
Гомогенного строения:								
Рослый рям							+	
Рям							+	
Комплексы:								
Рямово-мочажинный							+	
Рямово-озерково-топяной							+	
Грядово-мочажинный(ГМК)							+	
Грядово-мочажинно-озерков							+	
Сплавинно-топяной							+	

Примечание. * - Ступени богатства даны в соответствии со шкалами Л.Г.Раменского (Ramenskiyetal., 1956).

Поступила в редакцию: 16.05.2024
Переработанный вариант: 28.05.2024

STATE OF ISLAND SPRUCE FORESTS IN THE WESTERN PART OF THE BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA AFTER 23 YEARS

Lavrinenko O.V.^{1,2}, Lavrinenko I.A.¹, Simonova K.I.¹

¹ Komarov Botanical Institute RAS, St.-Petersburg

² Nenetsky State Nature Reserve, Naryan-Mar

lavrino@mail.ru

Цитирование: Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A., Simonova K.I. 2024. State of island spruce forests in the western part of the Bolshezemelskaya tundra after 23 years. *Environmental dynamics and global climate change*, 15(1): 30-67.

DOI: 10.18822/edgccc629471

Измерение морфометрических показателей деревьев и геоботанические описания, выполненные в 2000 г. в 8-ми еловых островках в подзоне южных тундр в бассейне р. Ортины и повторенные спустя почти четверть века, позволили оценить изменения в их структуре и ценофлоре при потеплении регионального климата. В еловых островках на водоразделах, изолированных от основного ареала *Picea obovata* и сохранившихся в тундре со времен голоцена, деревья росли в высоту со средней скоростью 4.3-8.3 см в год, радиальный прирост составил 0.41-0.65 мм в год. Для самого северного елового островка в долине реки, в более благоприятных микроклиматических условиях, эти показатели равны 12.2 см/год и 0.8 мм/год. Жизненность деревьев во всех островках увеличилась, что выразилось в изменении формы крон, которые стали более пышными и целиком зелеными. Еловые островки с кустарничково-зеленомошным напочвенным покровом характеризуются стабильной ценофлорой, состав и число видов изменились незначительно, за счет единичных, в основном споровых, растений. Несмотря на регулярное производство мужских и женских шишек, новых деревьев семенного происхождения не обнаружено. Сравнительные ландшафтные фотографии показывают активное внедрение в тундровые сообщества на водоразделах березы *Betula pubescens subsp. tortuosa*, а в долины водотоков также ольховника *Alnus fruticosa*. Северная граница еловых редколесий в долине р. Ортины сохранилась на широте 67°53' и дальше на север пока не продвинулась.

Ключевые слова: реликтовые еловые острова, граница редколесья, *Picea obovata*, восточноевропейские тундры, Арктика, изменение климата.

Modern climate warming, which began in the 1970s, has been observed throughout the Arctic including its Russian part [A report ..., 2023; Druckenmiller et al., 2021]. It is accompanied by a large number of papers by Russian and foreign scientists on the forest boundary advancement to the north, and its upper boundary in the mountains – up the slopes [Shiyatov et al., 2007, Harsch et al., 2009; Bolotov et al., 2012; Grigor'ev et al., 2013, 2019; Moiseev et al., 2019; Shiyatov et al., 2020; Timofeev et al., 2021; Dial et al., 2022; Hansson, 2022, etc.]. Climate change rate is high in the East European sector of the Arctic: over the last 35 years the average annual air temperature increase has reached +0.8°C/10 years [Malkova et al., 2021], the length of the growing season has increased by an average of 2 weeks and the amount of heat accumulated during this period has increased by an average of 85°C [Lavrinenko et al., 2022].

The northern forest boundary (timberline) in East European Russia is formed by *Picea obovata* and runs at N 67°30'-67°10'. In the Bolshezemelskaya Tundra, spruce is found rather far north of the forest boundary and even north of N 68°. Spruce islands have been preserved here since the Holocene in refugia – sites with favorable microclimatic and soil conditions. Relict spruce islands are groups of closely spaced, thin-stemmed trees occupying upland landform elements on sandy outcrops of watersheds. Skirt-shaped growth trees are united by a common root system and appear to be clones formed by vegetative propagation [Lavrinenko, Lavrinenko, 2004a].

In the framework of the international SPICE project, 8 spruce islands were discovered and studied at latitude N 67°54'-67°56' (Fig. 1). Complete relevés were carried out within the boundaries of the 5 islands. Species abundance was estimated using the Brown-Blanquet's scale [Becking, 1957]. The height of the tallest trunks was measured with a measuring tape and their diameter at the trunk base (in island E2 at a height of 50 cm) – with a caliper. In 2000, a spruce island was described at the northernmost site (N 68°17') near Cape Bolvansky Nos on the coast of the Pechora Bay of the Barents Sea (Fig. 1). The results of the spruce islands structure and cenoflora study have been published [Lavrinenko, Lavrinenko, 2003]. This data provided an opportunity to trace the changes of the islands 23 years later.

All spruce islands in the Ortina Basin were resurveyed between 20 and 30 July 2023. The study included tree morphometric measurements, geobotanical relevés and comparative landscape photography. The surveys on the islet at Cape Bolvansky Nos were carried out in 2000, 2014 and 2020 and included plant community relevés and photography and height measurements of the 6 tallest living spruce tops; photos were taken during a short visit in 2017.

Comparative analysis of the spruce islands composition and structure after almost a quarter of a century have shown:

1) In the Ortina River basin, in relict spruce islands on watersheds (E1, E4-E8), mean tree height has increased by 1.1-1.9 m and mean diameter – by 1.9-3.0 cm, i.e. mean height growth was 4.3-8.3 cm/year and radial growth was 0.41-0.65 mm/year. On a spruce island in the Ortina River valley (E2) with more favorable microclimatic conditions, these values were significantly higher – trees have grown on an average 2.8 m, diameter – 3.7 cm, i.e. height growth was 12.2 cm/year, radial growth – 0.8 mm/year (Table 1, Fig. 2a and б). In 2000 spruce island E3 was located on a sandy mound in the center of a sandy outcrop. By 2023 the mound has been almost completely destroyed by winds, the spruce looked like dying off and most likely it will disappear after some time (Fig. 9).

2) The shape of the tree crowns has changed. In 2000, spruce trees predominantly had "skirts" of well-developed lower branches. The upper part of the trees could have a cylindrical crown or the trunk could be partially devoid of branches with needles only at the top. By 2023, the crown of the most trees has become conical or narrow pyramidal with well-developed lower branches and green branches all over the trunk. On the E2 spruce island in the valley, the cone-shaped crowns of the trees have become lusher.

3) On all islands spruce has been spreading vegetatively by rooting lower branches and subsequently changing their growth from plagiotropic to orthotropic. This process has been especially active on the slopes of southern exposition. As a result, the area of the islands has slightly increased. Despite the abundance of both male strobiles and mixed-aged female cones, no undergrowth or freestanding young spruce trees were found in the surroundings. This indicates the absence of reproduction by seed for 23 years. The results prove the earlier suggestion that the northward advance of forests in watersheds is limited by the lack of quality seeds for sexual reproduction [Andreev, 1954; Norin, 1958; Surso, Barzut, 2010]. The earlier assumption that spruce islands could become a springboard for the spruce introduction into tundra communities under climate warming [Lavrinenko, Lavrinenko, 1999, 2004b] is currently not confirmed.

4) Comparative photos taken from the same angles in 2000 and 23 years later are shown for all spruce islands (Fig. 3-8, 10). They display a significant tree state improvement.

5) At Cape Bolvansky Nos in the northernmost spruce islet (N 68°17'), both a surge (in 2014) and a decline in spruce vitality have been recorded over the past 20-year period. There was no increase in island area observed, in 2020 the condition of the spruce was depressed and close to 2000 (Fig. 11).

6) The dwarf shrub green-mossy spruce islands cenoflora was characterised by stability. Changes in the species composition were due to single, predominantly cryptogamous plants (Table 2). Key species, in addition to *Picea obovata*, are: *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*, dwarf shrubs *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Linnaea borealis*, *Arctous alpina*, bryophytes *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens* and *Ptilidium ciliare*. *Juniperus sibirica* and *Betula nana* were often found in the shrub layer. The most active permanent herbaceous plant was *Festuca ovina* (Tables 1 and 2).

7) Landscape photos show the "greening" of surrounding tundra communities in watersheds and stream valleys in the Ortina River Basin due to climate warming. On watersheds, *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* has actively introduced into tundra communities, and juveniles and young trees have gained straight trunks from the base of the tree (Fig. 13). In the river valley and its tributaries, the area and height of bushes of *Juniperus sibirica*, shrubby willows and especially *Alnus fruticosa* have increased (Fig. 8a and б, 14).

8) The current position of the island spruce sparse forests` northern boundary in the Ortina River valley recorded on the satellite image is at latitude N 67°53' (Fig. 15) and has not changed over the last 20 years. The reason appears to be the lack of good quality seed for sexual reproduction. Monitoring studies could make it possible to trace the time when the boundaries of spruce sparse forests and spruce islands will close up in case of further possible climate warming. The distance between them is now quite small – 3-6 kilometers.

Key words: relict spruce islands, open forest border, *Picea obovata*, East European tundra, Arctic, climate change.

ВВЕДЕНИЕ

Границы экотона тайга – тундра, включающего участки лесной растительности разного размера и одиночные (пионерные) деревья в тундре, вызывают большой интерес в ландшафтно-экологических исследованиях, поскольку являются одним из показательных и чувствительных индикаторов изменений климата [Callaghan et al., 2002]. Неоднократный сдвиг границ этой переходной зоны за последнее тысячелетие обусловлен несколькими теплыми и сухими периодами (основной – средневековый климатический оптимум в X-XIII вв.), которые способствовали экспансии древесной растительности, и наоборот, холодными (малый ледниковый период в XIV-XIX вв.), вызвавшими гибель лесных опушек. С 10-20-х годов прошлого столетия отмечается этап экспансии древесной растительности дальше на север, связанный с потеплением, который продолжается вплоть до настоящего времени. В середине прошлого века В.Н. Андреев [Andreev, 1956] обобщил взгляды сторонников смещения границы леса к северу (А.В. Журавский, В.Р. Вильямс, Л.Н. Тюлина, В.С.

Говорухин, Б.А. Тихомиров, С. Регель и др.), а также сопоставил данные о положении современной на тот момент границы леса и лесных островов в тундре с их положением и состоянием в прошлом (по материалам исследований А.Г. Шренка, Г.И. Танфильева, Р. Поле). В.Н. Андреев показал, что в тех местах, где древесная растительность была отмечена 50-115 лет назад, она прочно удерживала свои позиции, а большинство крайнесеверных лесных островков, находившихся ранее в угнетенном состоянии, увеличили занимаемые площади, более того, появились новые лесные островки на месте заведомо безлесных тундровых участков. Кратковременное похолодание, имевшее место в 1940-х годах, привело лишь к незначительному изреживанию древостоев в нижнем течении р. Печоры [Shiyatov, 1976, 1981].

Основным фактором, определяющим положение границы леса, является температура. Еще А. Гризбах [Grisebach, 1872] установил, что в целом в глобальном масштабе граница леса практически совпадает с июльской изотермой температуры воздуха в 10°C. С использованием модели «TREELIM» показано, что необходимая для роста деревьев минимальная продолжительность вегетационного периода (число дней со средней температурой >0.9°C) составляет 94 дня, при этом средняя температура за все эти дни должна достигать не менее 6.4°C [Paulsen, Körner, 2014]. Эти результаты подтверждают теорию изотерм для естественного формирования границы леса – ее положение на большей части земного шара совпадает со средней температурой вегетационного периода 6-7°C. Границы, совпадающие с температурой выше этой, могут указывать на другие ограничивающие факторы для формирования древостоев [Maher et al., 2021]. К таким факторам, обуславливающим возможность выживания и существования деревьев в суровых климатических условиях, относятся наличие вечной мерзлоты, глубина сезонно-талого слоя, толщина снежного покрова, наличие склонов, защищающих от холодных северных ветров и обеспечивающих хороший дренаж, тип почв и другие региональные особенности. Речные долины с их отепляющим эффектом, наличием таликов, склоненными коренными берегами являются наиболее благоприятными местообитаниями для произрастания деревьев в тундре. По долинам рек, текущих в меридиональном направлении, деревья глубоко проникают в тундру, поэтому граница леса не прямолинейна, а заходит языками на север.

Современное потепление климата, которое наблюдается с 70-х годов прошлого века, регистрируется на всей территории Арктики и Российской ее части [Druckenmiller et al., 2021; A report..., 2023]. Продвижение границы леса к северу, а в горах – его верхней границы вверх по склонам, обусловленное региональным потеплением, подтверждено документально во многих исследованиях. Анализ набора данных из 166 мест по всему миру, на которых граница была зарегистрирована с 1900 г., показал, что только в двух местах она отступила, во всех остальных положение деревьев либо улучшилось (в 52% мест), либо осталось стабильным [Harsch et al., 2009]. Авторы установили связь между продвижением границы и зимним потеплением, а также бóльшую вероятность продвижения вперед границ, имеющих диффузную форму, по сравнению с резкими или криволинейными. Этот обзор глобального исследования границ древесной растительности был значительно расширен в диссертации А. Hansson [Hansson, 2022]. На основе анализа 142 публикаций и 477 мест с зафиксированной границей она показала, что лесной покров увеличился в высотном или широтном масштабе на 66% участков, а для *Pinaceae* еще значительно больше – на 72%.

Для горных местностей наиболее известны работы группы С.Г. Шиятова, который предложил метод сопоставления ландшафтных фотоснимков, сделанных с одних и тех же точек в разное время [Shiyatov, 2009]. Показано, что за последнее столетие в ответ на региональные потепление и увлажнение климата происходит интенсивная экспансия древесной и кустарниковой растительности в горные тундры и луга на Урале, плато Путорана и в Хибинах [Shiyatov et al., 2007, 2020; Grigor'ev et al., 2013, 2019; Moiseev et al., 2019; Timofeev et al., 2021, etc.]. Метод повторных ландшафтных фотоснимков, использованный И.Н. Болотовым с соавторами [Bolotov et al., 2012] для оценки изменения еловых древостоев в лесных островах на востоке Большеземельской тундры (урочище Пымвашор в бассейне р. Адзвы), позволил установить, что за 100 лет (сравнивали фотоснимки 1909 и 2010 гг.) произошло существенное увеличение площадей лесных островов, густоты и высоты древостоя, формирование сомкнутых лесных сообществ и редколесий на месте редин.

В работе S. Kruse с соавторами [Kruse et al., 2019] с использованием модели «LAVESI» показано медленное продвижение лиственных редколесий на юге Таймыра: скорость миграции на север границы деревьев составила 1.6 м/год, а границы леса – 0.6 м/год. Однако авторы отмечают, что миграция может ускориться, если в тундре есть реликтовые острова и отдельные деревья, которые станут ядрами для быстрого заселения тундры. В то же время в работе В.И. Харук с соавторами [Kharuk et al., 2005] получены существенно бóльшие скорости динамики лиственницы в самом северном в мире лесном массиве «Ары-Мас». На основе материалов спутниковых снимков Landsat и

Согласно, полученных в 1965-2000 гг., они установили увеличение сомкнутости лиственничников и их продвижение в тундру со скоростью 3-11 м/год. Максимальное увеличение площади (~65%) наблюдали для древостоев, по сравнению с рединами и редколесьями. Из последних работ наиболее показательна статья R.J. Dial с коллегами [Dial et al., 2022], где показана экстремально высокая скорость (>4 км за десятилетие) продвижения популяции ели *Picea glauca*, изолированной от границы леса севернее хребта Брукс на Аляске. Каждое десятилетие популяция удваивается, при этом экспоненциальный радиальный рост основных стволов отдельных деревьев положительно коррелирует с июльской температурой воздуха.

В работе W.G. Rees с соавторами [Rees et al., 2020] прослежена взаимосвязь между изменениями климата на протяжении XX в. и продвижением границ экотона лес – тундра на 151 участке в равнинных и горных территориях циркумполярной Арктики. Показано, что на изменение границ большее влияние оказывали не температуры воздуха, а количество осадков. Кроме того, важными для продвижения границ древесной растительности оказались не только летние, но и не относящиеся к вегетационному сезону месяцы. Скорость продвижения в широтном направлении существенно различалась по регионам: она была наименьшей в Восточной Канаде (~10 м/год) и наибольшей в регионе, объединившем Фенноскандию, Кольский полуостров и Полярный Урал (~100 м/год). Авторы заключили, что наблюдаемое отсутствие равномерного продвижения древесной растительности и его темпы, значительно уступающие скорости изменения климата, делают маловероятными основанные на равновесных моделях темпы продвижения на север границ экотона лес – тундра, соответствующие прогнозируемой в XXI в. скорости изменения климата (~10³-10⁴ м/год).

На территории Большеземельской и Малоземельской тундры (по данным ряда метеостанций Ненецкого автономного округа – НАО) климатические изменения имеют высокие темпы: за последние 35 лет скорость роста среднегодовой температуры воздуха достигла +0.8°C/10 лет [Malkova et al., 2021]. Реакция растительности на потепление, помимо непосредственного влияния температуры воздуха, определяется многими факторами – удлинением вегетационного периода, ускорением таяния снега, колебаниями влажности и глубины оттаивания почвы, температуры почвы в корнеобитаемой зоне и др. [Schuur et al., 2007; Oberbauer et al., 2013; Harris et al., 2021]. В НАО за последние 30 лет годовое число заморозков значимо уменьшилось (на 14-21 день), продолжительность периода вегетации увеличилась в среднем на 2 недели, а сумма накопленного за этот период тепла – в среднем на 85°C [Lavrinenko et al., 2022]; наблюдаются тенденции к увеличению среднего количества атмосферных осадков на 100 мм/год (с 350 до 450 мм) и возрастанию толщины снежного покрова (с 40-50 см в начале века до 70-80 см в последние годы); установлено изменение и других опосредованных, важных для растений показателей – увеличение глубины сезонного талого слоя за последние десять лет, повышение температуры многолетнемерзлых пород и их частичное оттаивание сверху с образованием несквозных таликов [Malkova et al., 2021].

Такие существенные и продолжительные климатические изменения не могут не сказаться на растительном покрове, хотя, несомненно, ответная реакция растительности имеет период запаздывания, который для границы леса оценивается в несколько десятилетий [Harsch et al., 2009]. Поэтому документированное подтверждение изменения растительного покрова с течением времени и в ответ на потепление климата является исключительно важным.

Граница леса на севере восточноевропейской части России образована елью сибирской *Picea obovata* и проходит по 67°30'-67°10' с. ш. В разных ландшафтах на местности она представлена и как четкая фронтальная линия (timberline, ≈100 деревьев/га), и как диффузная зона в виде отдельных еловых островов и одиночных деревьев (treeline, ≈1 дерево/га), расположенных перед границей леса.

На территории Большеземельской и Малоземельской тундры ель обнаруживается существенно севернее границы леса, и севернее 68°с.ш., в рефугиумах – местах с благоприятными микроклиматическими и почвенно-грунтовыми условиями. Такие лесные островки на водоразделах тундры отмечали ещё советские геоботаники, изучающие взаимоотношения между лесом и тундрой [Yudin, 1954; 1956]. Происхождение их связано с теплым атлантическим временем голоцена (8-5 тыс. лет назад), когда ель росла на большей части восточноевропейских тундр. С началом суббореального периода (~4.5 тыс. лет назад) произошел наиболее резкий сдвиг границы распространения хвойных деревьев к югу, обусловленный похолоданием и усилившейся нестабильностью климата. Однако изолированные популяции ели сохранились на территории тундры в рефугиумах. Существование ели в течение субатлантического (2.3 тыс. – 200 лет назад) и современного времени можно образно представить в виде локальных очагов, уменьшающих или увеличивающих свою площадь в

зависимости от изменений климата. В периоды потеплений происходило расселение деревьев из рефугиумов в тундровые сообщества, а похолодания – их отмирание [Lavrinenko, Lavrinenko, 2003]. В рамках выполнения Международного проекта SPICE (2000-2003 гг.) было показано, что на северном пределе распространения в бассейнах рек Ортина, Море-Ю (Большеземельская тундра) и Нерута (Малоземельская тундра) ель сибирская существует как в форме небольших крайнесеверных островков, занимающих прежнее положение в рельефе со времен голоцена (на водоразделах), так и в виде более южных современных еловых редколесий, оккупировавших наиболее благоприятные местообитания в тундре (долины рек) в течение последних полутора столетий. Названные реки объединяет то, что они текут с юга на север через плато, сложенные мощной толщей песков, отложенных бореальной морской трансгрессией, имевшей место в Микулинское межледниковье, и переотложенных впоследствии ледником [Quaternary glaciations ..., 1987; Development of landscapes ..., 1993; Andreicheva, 2002]. Господство в этих районах песков, хорошо дренируемых и легко прогреваемых, является одним из основных экологических факторов, определяющих сохранение и распространение здесь деревьев. Кроме того, районы характеризуются холмисто-увалистым или рассеченным рельефом, и, следовательно, наличием склонов, дающих укрытие от холодных ветров. Различия в типе размножения, имеющие место в реликтовых островах и современных еловых редколесьях, обуславливают различия в форме их роста. Современные еловые редколесья в долинах рек по структуре древостоя подобны ельникам лесотундры. Для них характерно, преимущественно, семенное возобновление ели, о чем говорит наличие проростков и разновозрастного подроста. Реликтовые островки представляют собой сближенные группы тонкоствольных деревьев, занимающих возвышенные элементы рельефа на песчаных обнажениях водоразделов – бугры в центральных частях котловин выдувания и внешние части их бортов. Такие деревца, часто имеющие юбочную форму роста, объединены общей корневой системой и представляют собой клоны, образовавшиеся путем вегетативного размножения [Lavrinenko, Lavrinenko, 2004a]. Возраст отдельных стволов диаметром 4.5-6.0 см составляет 60-70 лет, а возраст всей группы может, по видимому, достигать нескольких сотен лет [Lavrinenko, Lavrinenko, 2003]. Наличие бугров с еловыми островками посреди обширных песчаных обнажений позволяет утверждать, что в прошлом на их месте существовали холмы высотой от нескольких до 10 метров. В благоприятные периоды голоцена холмы были облесены, о чем свидетельствует наличие под еловыми останцами погребенного подзолистого горизонта на глубине 0.5-1.0 м. Его радиоуглеродная датировка в бассейне р. Море-Ю показала среднесуббореальный возраст (3350 лет назад) [Rusanova, Deneva, 2006].

Ранее было предложено [Lavrinenko, Lavrinenko, 1999; 2004b] использовать изолированные еловые острова в тундровой зоне в качестве фитоиндикаторов климатических изменений, и высказано предположение, что они станут «трамплинами» для внедрения в тундровые сообщества деревьев и сопутствующих им таежных видов растений.

Целью этого исследования было повторить спустя 23 года морфометрические измерения деревьев, геоботаническое обследование и сравнительное ландшафтное фотографирование еловых островов, расположенных в западной части Большеземельской тундры (бассейн р. Ортины и мыс Болванский Нос), а также зафиксировать на спутниковом снимке современную границу еловых редколесий в долине р. Ортины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Геоботанические исследования

В 2000 г. в среднем течении р. Ортины в Большеземельской тундре (подзона южных тундр) было обнаружено и изучено 8 еловых островков (полевые номера – E1-E8) на широте N 67°54'-67°56', которые были позиционированы на местности с помощью GPS-навигатора. Минимальное расстояние между этими островками и широтной границей распространения сплошных еловых редколесий, которая на правом берегу р. Печоры поднимается на север почти до г. Нарьян-Мара, составляет 40-50 км (Рис. 1).

В границах 5-ти островков (границу определяли по проекции на землю нижних веток елей) были выполнены полные геоботанические описания, выявлены все виды (сосудистые, мохообразные, лишайники) с оценкой проективного покрытия (%) в целом, по основным жизненным формам и каждого вида. Поскольку объективно оценить проективное покрытие отдельных видов в процентах проблематично (если это не специальные исследования на площадках), то правильнее использовать шкалу обилия-встречаемости с пределами варьирования. Поэтому проективное покрытие видов

переведено в баллы шкалы Браун-Бланке [Becking, 1957]: г – единично; + – менее 1%; 1 – 1-5%; 2а – 6-12%; 2b – 13-25%; 3 – 26-50%; 4 – 51-75%; 5 – 76-100%. В 3-х островках были отмечены лишь доминирующие виды. С помощью рулетки была измерена высота стволов и с помощью штангенциркуля – их диаметр у основания (в островке E2 – на высоте 50 см). Поскольку деревья в островках растут тесно сближенными группами, представляющими собой клоны, то наиболее высокие и более-менее выровненные по высоте стволы расположены, как правило, в центре группы, а более низкие, представляющие собой укоренившиеся и начавшие расти вертикально ветки, – по периферии группы. Измерения проводили на наиболее высоких деревьях, делали зарисовки групп островков, где их нумеровали, а в примечаниях отмечали особенности измеренных стволов (например, дву- или многовершинность, сухая вершина, ствол внизу искривлен и пр.). Кроме 8-ми островков в бассейне р. Ортины, в 2000 г. был описан еловый островок E16 в наиболее северной точке (N 68°17') – на мысе Болванский Нос на побережье Печорской губы Баренцева моря (Рис. 1). Зональная растительность (осоково-кустарничково-моховые тундры с пятнами-медальонами) позволяет позиционировать этот район в подзоне типичных тундр, однако из-за близости дельты р. Печоры локальная флора мыса относится к бореальному типу [Lavrinenko et al., 2019]. Результаты изучения структуры и ценофлоры еловых островков были опубликованы [Lavrinenko, Lavrinenko, 2003].

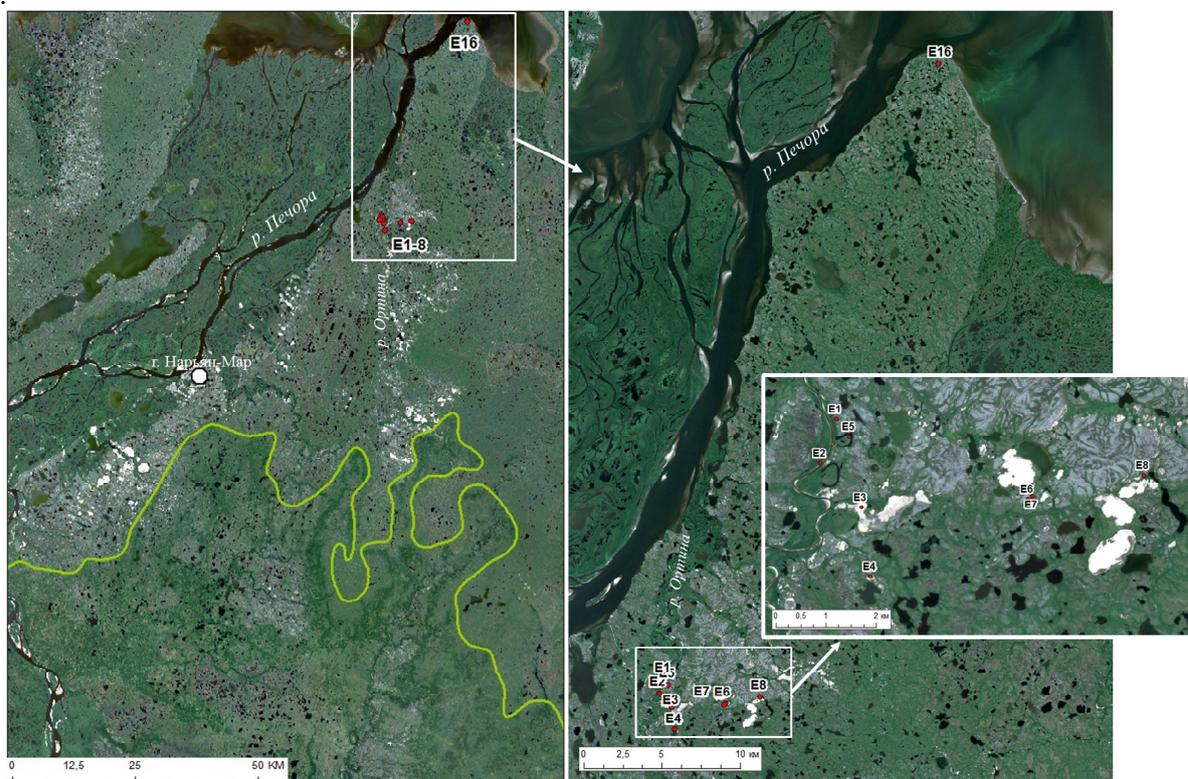


Рисунок 1. Картограмма районов исследований. E1-E8 – еловые островки в бассейне р. Ортины; E16 – еловый островок на мысе Болванский Нос (справа снимок Sentinel 2A от 11.08.2023 г.); зеленой линией обозначена граница распространения сплошных еловых редколесий (слева мозаика из 4-х снимков Landsat 9 от 15.07.2023 г. и 2.08.2023 г.).

В период с 20 по 30 июля 2023 г. все еловые островки в бассейне р. Ортины были обнаружены и обследованы повторно. В их границах был выявлен полный видовой состав сосудистых растений, мохообразных и лишайников (напочвенных и эпибриофитов) с оценкой проективного покрытия (%) в целом и по основным жизненным формам и баллов обилия-встречаемости по шкале Браун-Бланке для каждого вида. Высоту деревьев измеряли с помощью рулетки, диаметр стволов у основания (в островке E2 – на высоте 50 см) – с помощью штангенциркуля. Параметры измерены у 48 деревьев в тех же группах, что и в 2000 г. Для всех средних значений вычисляли стандартную ошибку среднего арифметического. Сообщества фотографировали с тех же ракурсов и точек, что и в 2000 г. Кроме того, фотографии островков были сделаны с высоты 10-40 м с помощью БПЛА Mavic-Pro.

В островке на мысе Болванский Нос геоботанические описания с фотографированием сообществ и измерением высоты 6-ти наиболее высоких живых вершинок ели были выполнены в

2000 г. и повторно в 2014 и 2020 гг., а в 2017 г. при кратковременном заезде были сделаны только фотографии.

Номенклатура таксонов сосудистых растений дана по сводке Н.А. Секретаревой [Sekretareva, 2004], мхов – по М.С. Ignatov с соавторами [Ignatov et al., 2006], печеночников – по А.Д. Потёмкину и Е.В. Софроновой [Potemkin, Sofronova, 2009], лишайников – по R. Santesson с соавторами [Santesson et al, 2004].

Спутниковые снимки

Для определения современной границы еловых редколесий в долине р. Ортины использовали спутниковый снимок Sentinel 2A с пространственным разрешением 10×10 м от 11.08.2023 г., для валидации результатов обработки – снимки более высокого пространственного разрешения из источников с открытым доступом (Google Earth от 09.07.2004 г. и SAS Planet (точная дата не известна, но по косвенным данным он позже 2014 г.)).

Сегментацию ключевого участка спутникового снимка выполнили в программе eCognition Developer на основе спектральных слоев и рассчитанных индексов: три слоя видимого спектра излучения (RGB) и ближний инфракрасный диапазон (NIR), нормализованный вегетационный индекс (NDVI) и нормализованный водный индекс (NDWI). Результаты сегментации экспортировали в ArcGIS, контуры еловых редколесий уточняли, используя снимки Google Earth и SAS Planet.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ состава и структуры еловых островов спустя 23 года

Реликтовые еловые островки на водоразделах

Островок Е1¹ расположен на краю высокого коренного правого берега р. Ортины (N 67°56'21.5", E 54°02'26.8") и является самым северным на водоразделе и в целом в бассейне реки. Он состоит из 4-х отстоящих друг от друга островков на периферии обширного (160×100 м) старого песчаного обнажения, заросшего мохово-лишайниково-кустарничковой тундровой растительностью (Рис. П1). Самый большой островок площадью 21×8 м находится на песчаном бугре (2-3 м высотой) и представлен несколькими группами (клонами) тесно расположенных елей (1, 4-6); три других островка-клона представлены плотными группами деревьев 2-3 м в диаметре (2, 3 и 7) на выположенных участках, и отстоят от первого на 7-12 м (Рис. П2). Расстояние между тонкими деревцами в группах – 20-50 (70) см.

В 2000 г. высота 14 измеренных деревьев в 6-ти группах варьировала от 1.4 до 4.0 м со средним значением 2.4 ± 0.2 м, диаметр стволов – от 5.8 до 15.0 см со средним значением 9.0 ± 0.7 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Деревья были угнетены, преобладала юбочная форма роста. Стволы большинства деревьев в срединной части были лишены веток (результат снеговой корразии), имели изогнутую вершину или две (три) вершины (Рис. 3а и б). Часть деревьев довольно давно были срублены на высоте около 70 см (по-видимому, оленеводами в зимний период) и функцию вершины взяли на себя нижние ветки, образовав невысокие деревца с толстыми в основании стволами. Шишки прошлого года висели на нижних ветках, на некоторых очень обильно. На концах многих веток наблюдали оранжевые галлы тли-хермеса (*Adelgidae*). Деревья были обильно покрыты лишайниками, на лишенных веток стволах преобладала *Melanelia septentrionalis*, на нижних ветках – *Hypogymnia physodes* [Лавриненко и Лавриненко, 2003]. Геоботаническое описание было сделано на песчаном бугре в границах елового редколесья злаково-кустарничково-зеленомошного (Таблица 2). Проективное покрытие *Picea obovata* составляло 50%. В примеси (покрытие 5%) отмечали *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* с искривленными в нижней части стволами, которая по высоте была чуть ниже ели. Кустарничков (*Arctous alpina*, *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*) было мало (покрытие 10%). Моховой покров не был сомкнут (35 %), бриофиты располагались непосредственно под группами елей, преобладали зеленые мхи (*Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens*) и печеночник *Ptilidium ciliare*. На песчаных участках между группами деревьев был сформирован травяной покров из *Festuca ovina*. Всего в островке было выявлено 27 видов, численно преобладали мхи и лишайники.

В 2023 г. высота 14 деревьев в этих же группах варьировала от 3.2 до 4.8 м со средним значением 4.0 ± 0.1 м, диаметр стволов – от 9.5 до 17.5 см со средним значением 12.0 ± 0.7 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Деревья ели значительно (почти в 2 раза) увеличились по высоте, обогнав березу, что

¹ здесь и далее полевой номер елового островка.

хорошо видно на фотоснимках, снятых с тех же ракурсов, что и 23 года назад (Рис. 3в и г). У многих деревьев исчез разрыв между юбкой из нижних ветвей и флаговой вершиной, то есть их кроны стали конусовидными и узкопирамидальными. Увеличилось число стволов в группах. Например, в отдельно стоящей группе Е1.7 в 2000 г. было 15 маленьких (~2.5 м высотой) елочек. В 2023 г. стало 19 стволов (и 1 сухой), из них высокие в центре имели высоту 4.6-4.9 м, а 5 маленьких по периферии – 1.1-1.5 м.

Таблица 1. Высота и диаметр стволов деревьев в еловых островках бассейна р. Ортины при первичном обследовании и спустя 23 года

Номер острова	Номер группы	Высота стволов, м		Диаметр стволов, см	
		2000 г.	2023 г.	2000 г.	2023 г.
Е1	1	1.4, 1.8, 2.0, 2.3, 2.3, 2.5	3.2, 3.2, 3.5, 3.8	6.3, 6.6, 7.2, 7.7, 8.4, 8.6	9.6, 9.6, 10.9, 11.3
	2	1.7, 3.2, 3.5, 4.0	4.2, 4.3, 4.3, 4.5, 4.8	10.5, 11.3, 13.0, 15.0	11.8, 13.1, 13.7, 17.5, 17.5
	3	1.8	3.5, 4.6	9.2	11.8, 12.7
	4	2.2	4.0	5.8	10.2
	5	2.5	3.7	7.2	9.5
	6	3.0	4.6	9.5	13.4
	Среднее	2.4±0.2	4.0±0.1	9.0±0.7	12.0±0.7
Е2		5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 8.0	9.0, 9.0, 10.0, 10.0, 10.0	16.0, 21.0, 23.0, 25.0, 25.0	20.7, 21.0, 26.1, 29.3, 31.2
	Среднее	6.8±0.6	9.6±0.2	22.0±1.7	25.7±2.1
Е3		0.43, 0.47, 0.85, 0.90, 0.90	1.2	2.1, 2.3, 3.2, 3.7, 4.0	4.0
	Среднее	0.7±0.1	1.2	3.1±0.4	4.0
Е4	1	2.0, 3.5	3.8, 5.0	3.8, 11.0	8.3, 15.6
	2	1.2	2.0	3.2	4.8
	3	2.8	3.3	6.9	7.3
	4	4.0	6.0	14.0	19.1
	5	2.1	4.5	5.5	8.1
	6	1.4	2.0	2.9	4.8
	7	2.5	4.0	7.9	9.2
	Среднее	2.4±0.4	3.8±0.5	6.9±1.4	9.6±1.8
Е5	1	2.6	3.7	5.6	8.3
	2	2.8	4.1	5.5	9.5
	3	3.3	4.0	6.2	8.3
	Среднее	2.9±0.2	3.9±0.1	5.8±0.2	8.7±0.4
Е6		3.8, 4.5	6.0, 6.2, 6.2	10.5, 14.0	12.7, 13.4, 18.8
	Среднее	4.2±0.4	6.1±0.1	12.3±1.8	15.0±0.7
Е7		1.4, 1.7, 3.3, 4.2, 5.0	2.5, 2.4, 4.5, 5.3, 6.0	5.0, 6.0, 8.6, 11.5, 13.2	5.1, 8.0, 10.8, 11.1, 19.1
	Среднее	3.1±0.7	4.1±0.7	8.9±1.6	10.8±2.3
Е8		3.2, 4.5, 5.5, 5.5	3.6, 5.5, 7.0, 7.2	6.3, 12.0, 12.5, 14.7	6.7, 13.4, 16.9, 19.1
	Среднее	4.7±0.6	5.8±0.9	11.4±1.8	14.0±2.7

Таблица 2. Видовой состав с обилием видов в реликтовых еловых островках бассейна р. Ортины и на мысе Болванский Нос при первичных и повторных геоботанических описаниях

	Район	р. Ортина								Болванский нос			р. Ортина	
	Дата	02.07.2000	20.07.2023	03.07.2000	22.07.2023	05.07.2000	21.07.2023	04.07.2000	20.07.2023	19.07.2000	20.07.2014	26.07.2020	03.07.2000	22.07.2023
	Широта	67°56'21.5"		67°54'37.5"		67°55'24.7"		67°56'09.7"		68°17'19.1"			67°55'23.1"	
	Долгота	54°02'26.8"		54°03'11.8"		54°07'54.5"		54°02'48.0"		54°30'40.0"			54°03'02.3"	
Жизненная форма	Проективное покрытие (%), общее	90	100	100	100	90	99	100	100	100	100	100	65	2
	деревьев	55	70	30	65	25	65	25	65	30	40	40	3	<1
	кустарников	<1	<1	2	10	5	5	10	5	45	40	40	0	0
	кустарничков	10	50	60	40	40	70	30	50	30	30	40	45	1
	трав	15	<1	<1	25	3	5	5	5	10	15	30	20	<1
	мохообразных	35	60	10	30	15	30	30	60	50	55	55	1	0
	лишайников	<1	5	5	10	5	10	3	<1	<1	<1	<1	<1	0
	Число видов, всего	26	43	43	48	53	60	34	47	39	47	48	17	10
	деревьев	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
	кустарников	1	1	2	2	2	1	3	3	3	3	3	0	0
	кустарничков	3	3	7	7	3	6	4	5	6	6	6	3	1
	трав	3	8	9	11	9	11	13	17	18	23	21	8	8
	мохообразных	6	10	8	8	10	13	7	9	5	5	6	1	0
	лишайников	11	19	15	18	27	27	5	11	6	9	11	4	0
		Полевой номер елового островка	Е1		Е4		Е7		Е5		Е16			Е3
Константные виды кустарничково-зеленомошных ельников														
д	<i>Picea obovata</i>	3	4	3	4	2b	3	2b	4	3	3	3	1	+
д	<i>Betula pubescens</i> subsp. <i>tortuosa</i>	2a	2a	+	1	2a	2b	1	2a	.	.	.	.	.
кч	<i>Empetrum hermaphroditum</i>	1	2b	2a	2b	2b	2b	+	3	1	1	1	2b	.
кч	<i>Arctous alpina</i>	2a	+	2a	1	2a	1	+	1	+	1	+	2b	.
кч	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	2a	3	3	2b	2a	3	+	1	2a	1	1	.	.
м	<i>Pleurozium schreberi</i>	2b	3	2a	2b	2a	2b	2b	2b	2b	2b	2b	.	.
м	<i>Hylocomium splendens</i>	2a	2a	1	2a	+	+	+	1	2b	3	3	.	.
п	<i>Ptilidium ciliare</i>	2a	2a	+	2a	+	1	+	2a	+	1	1	.	.
к	<i>Betula nana</i>	.	.	+	+	1	.	2a	1	3	2b	2b	.	.
т	<i>Festuca ovina</i>	2b	+	+	1	1	1	+	+	1	1	1	1	+
т	<i>Tanacetum bipinnatum</i>	+	r	+	+	+	+	+	+	r	r	r	1	+
л	<i>Cladonia arbuscula</i>	+	+	1	1	+	2a	1	+	+	+	+	.	.
л	<i>Cetraria islandica</i> subsp. <i>crispiformis</i>	+	.	+	+	+	+	+	r	r	r	r	+	.
к	<i>Juniperus sibirica</i>	+	r	+	2a	+	1	+	+	.	.	.	.	.
м	<i>Dicranum majus</i>	1	1	+	1	+	+	1	1	.	.	.	.	.
м	<i>Sanionia uncinata</i>	+	+	+	1	+	+	+	+	.	.	.	.	.
Виды, постоянные в 1-3 еловых островках														
л	<i>Flavocetraria cucullata</i>	+	+	1	+	+	1	.	r	.	.	.	+	.
л	<i>Peltigera malacea</i>	+	r	+	1	+	+	.	.	.	r	+	.	.
л	<i>P. didactyla</i>	+	r	+	r	+	r	.	.	.	.	.	.	.
л	<i>Cladonia cornuta</i> subsp. <i>cornuta</i>	+	+	+	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.
л	<i>C. amaurocraea</i>	+	+	.	+	+	+	.	.	.	.	.	.	.
л	<i>C. chlorophaea</i>	+	r	.	.	+	+	.	r	.	.	.	.	.
л	<i>C. coccifera</i>	+	+	.	r	+	r	.	r	.	.	.	.	.
л	<i>C. gracilis</i> subsp. <i>elongata</i>	.	+	+	+	+	+	+	r	.	r	r	.	.
л	<i>C. uncialis</i>	.	.	+	+	+	+	1	r	.	.	.	.	.
т	<i>Avenella flexuosa</i>	.	.	+	1	.	r	1	1	.	.	.	.	.
т	<i>Hieracium alpinum</i>	.	r	+	r	.	r	+	+	.	.	.	.	.
кч	<i>Vaccinium myrtillus</i>	.	.	+	+	.	+	2b	+	.	.	.	.	.
кч	<i>V. uliginosum</i> subsp. <i>microphyllum</i>	.	.	+	+	.	.	.	1	2a	2a	2a	.	.
кч	<i>Linnaea borealis</i>	.	.	+	2b	.	.	.	.	2a	2a	2b	.	.
кч	<i>Ledum palustre</i> subsp. <i>decumbens</i>	.	.	r	r	.	r	.	.	+	+	+	.	.
л	<i>Peltigera aphthosa</i>	.	.	+	+	+	.	.	.	+	+	+	.	.
л	<i>Stereocaulon paschale</i>	.	.	+	r	.	.	.	.	r	r	r	.	.
л	<i>S. rivulorum</i>	.	.	r	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Продолжение Таблица 2.

Жизненная форма	Полевой номер елового островка	E1		E4		E7		E5		E16			E3	
		.	.	+	+	.	+
Л	<i>Cladonia maxima</i>	.	.	+	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.
М	<i>Polytrichum juniperinum</i>	.	.	+	1	+	+	.	.	.	.	.	.	.
М	<i>Aulacomnium turgidum</i>	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Alectoria nigricans</i>	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Bryocaulon divergens</i>	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Flavocetraria nivalis</i>	r	.	r	.	+	+	.	.	.	.	r	.	.
Л	<i>Solorina crocea</i>	.	.	.	.	r	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Stereocaulon alpinum</i>	.	.	r	.	+	+	.	.	.	.	.	r	.
Л	<i>Thamnolia vermicularis</i>	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Cladonia pleurota</i>	.	r	.	.	r	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. rangiferina</i>	.	+	.	+	+	+	.	+	+	+	.	.	.
Т	<i>Rubus chamaemorus</i>	.	.	.	.	.	.	+	1	.	.	.	.	.
Т	<i>Carex aquatilis</i> subsp. <i>stans</i>	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.
Т	<i>Chamaenerion angustifolium</i>	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.
К	<i>Salix glauca</i>	.	.	.	.	.	.	r	r	2a	2a	2b	.	.
Т	<i>Equisetum arvense</i>	.	r	.	.	.	.	+	+	+	1	2a	.	.
Т	<i>Pedicularis lapponica</i>	.	.	.	.	.	.	+	+	+	+	+	.	.
Т	<i>Rubus arcticus</i>	.	.	.	.	.	.	+	+	+	+	r	.	.
Т	<i>Solidago lapponica</i>	.	r	.	r	.	r	r	r	+	+	+	.	.
М	<i>Polytrichum commune</i>	.	.	.	.	.	.	+	+	+	+	+	.	.
К	<i>Salix lanata</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	2a	1	.	.
Т	<i>Bartsia alpina</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.
Т	<i>Bistorta elliptica</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	r	r	r	.	.
Т	<i>Delphinium elatum</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	1	.	.
Т	<i>Diphasiastrum alpinum</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	r	r	r	.	.
Т	<i>Festuca rubra</i> subsp. <i>arctica</i>	.	.	.	r	r	.	.	.	+	+	+	.	.
Т	<i>Lycopodium dubium</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	1	r	+	.	.
Т	<i>Tephroses integrifolia</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	r	r	r	.	.
Т	<i>Stellaria peduncularis</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	r	.	.
М	<i>Dicranum spadiceum</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1	1	.	.
Л	<i>Cladonia stellaris</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	r	r	r	.	.
Т	<i>Calamagrostis lapponica</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	2b	.	.
Т	<i>Poa alpigena</i>	.	.	r	.	.	.	.	.	.	1	+	.	.
Т	<i>P. arctica</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.
Т	<i>Equisetum scirpoides</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	r	.	.
Л	<i>Peltigera leucophlebia</i>	.	.	.	+	.	.	.	.	.	r	r	.	.
КЧ	<i>Salix nummularia</i>	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	2a	1
В том числе константные травянистые псаммофиты														
Т	<i>Koeleria pohleana</i>	+	r	+	.	+	r	.	.	.	.	.	+	+
Т	<i>Armeria scabra</i>	.	r	+	r	+	r	.	r	.	.	.	1	r
Т	<i>Antennaria dioica</i>	.	.	+	r	+	r	+	r	.	.	.	.	.
Т	<i>Campanula rotundifolia</i>	.	r	.	r	r	r	.	r	r	r	r	r	.
Т	<i>Juncus trifidus</i>	.	.	.	.	r	r	.	.	.	.	.	.	.
Т	<i>Rumex graminifolius</i>	.	.	.	.	r	r	.	.	.	.	.	r	r
Т	<i>Polemonium boreale</i>	.	.	+	r	.	.	+	.	.	+	r	+	+
Т	<i>Achillea millefolium</i>	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	1	r
Не постоянные виды														
Т	<i>Trientalis europaea</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	r	.	.
М	<i>Ceratodon purpureus</i>	.	.	.	r	r	.	.	.	.	.	.	.	.
М	<i>Pohlia nutans</i>	.	+	r	.	.	r	.	.	.	.	.	1	.
М	<i>Polytrichum piliferum</i>	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.
М	<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>	.	1	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
Л	<i>Cetraria islandica</i> subsp. <i>islandica</i>	.	.	.	.	r	.	.	+	.	.	.	.	.
Л	<i>Cladonia fimbriata</i>	.	r	.	+	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. cenotea</i>	.	r	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. deformis</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.

Продолжение Таблица 2.

Жизненная форма	Полевой номер слового островка	E1		E4		E7		E5		E16		E3	
Л	<i>C. botrytes</i>	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Sphaerophorus globosus</i>	.	+	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.
М	<i>Cynodontium strumiferum</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
М	<i>Dicranum fuscescens</i>	.	l	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
М	<i>Ptilium crista-castrensis</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Cladonia cornuta</i> subsp. <i>groenlandica</i>	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. cyanipes</i>	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. scabriuscula</i>	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Ochrolechia frigida</i>	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Peltigera membranacea</i>	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>P. scabrosa</i>	.	.	.	+	.	.	r	.	.	.	.	.
М	<i>Leptobryum pyriforme</i>	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Alectoria ochroleuca</i>	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Baeomyces carneus</i>	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Baeomyces placophyllus</i>	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Cladonia pyxidata</i>	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. verticillata</i>	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Peltigera rufescens</i>	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
М	<i>Dicranum flexicaule</i>	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
М	<i>D. scoparium</i>	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
М	<i>Tetraplodon mnioides</i>	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.
Л	<i>Cladonia crispata</i> var. <i>ctrariiformis</i>	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. macrophylla</i>	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. rei</i>	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. stygia</i>	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.
Л	<i>C. phyllophora</i>	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.
Т	<i>Veratrum lobelianum</i>	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.
Т	<i>Peltigera polydactylon</i>	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.
Т	<i>Adoxa moschatellina</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.
Т	<i>Equisetum pratense</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	l	l	.	.
Т	<i>Luzula multiflora</i> subsp. <i>frigida</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	r	r	.	.
М	<i>Rhytidium rugosum</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.
Л	<i>Cetraria aculeata</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r
Т	<i>Festuca sabulosa</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
П	Liverwort	+	.	+	+	+	+	+	2b	.	.	.	.

Примечание. Полужирным шрифтом выделены баллы обилия, изменившиеся на 2 и более пункта. Здесь и в Таблице 3 жизненные формы: д – дерево, к – кустарник, кч – кустарничек, т – трава, м – мох, п – печеночник, л – лишайник.

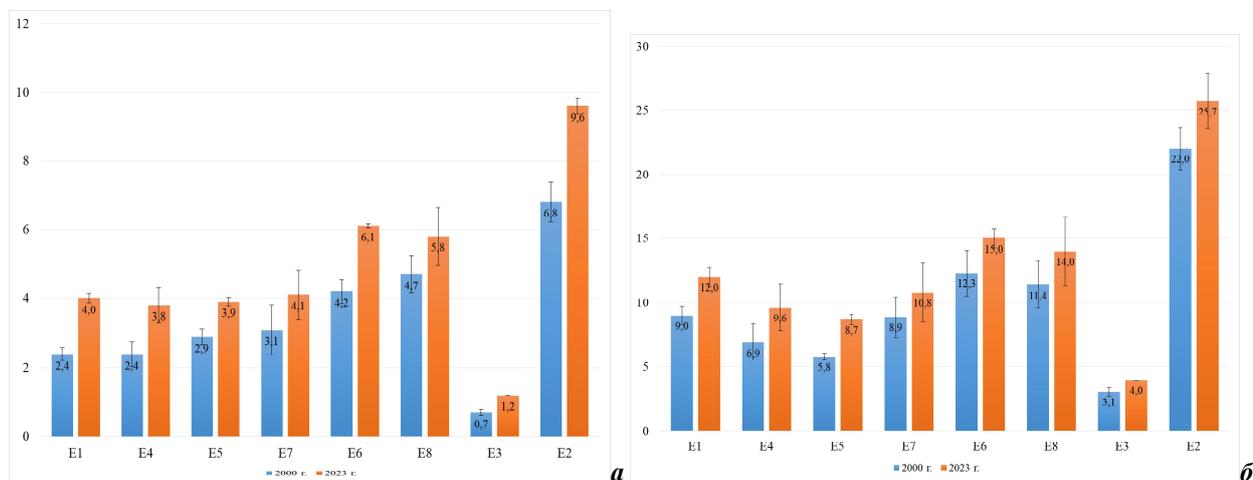


Рисунок 2а и б. Параметры стволов ели в словых островках E1-E8 в 2000 и 2023 гг.: а – высота, м; б – диаметр, см.



Рисунок 3а-г. Еловый островок Е1: а и б – 2000 г., вид с южной и восточной стороны, соответственно; в и г – 2023 г., вид с тех же позиций.

Скорость роста ели в защищенных условиях можно оценить по отдельно растущему деревцу с южной стороны бугра (на Рис. 3а и 5в оно промаркировано красной линией). Это тоже укоренившаяся ветка, у которой в 2000 г. ствол (0.7 м высотой) был дугообразно изогнут в нижней части. В 2023 г. высота его составила 3 м (верхушечный прирост этого года 37 см), диаметр нижней юбки 2.4 м, ее высота 0.5 м. Над юбкой ствол на протяжении 0.9 м лишен веток, а выше имеет густую крону.

Несмотря на обилие шишек прошлого и этого года на ветках, а также на земле, новых деревьев ели семенного происхождения не обнаружено, все вновь появившиеся деревца имеют тесную связь со своей группой, и есть не что иное, как засыпанные песком и укоренившиеся нижние ветки, начавшие расти вверх.

За 23 года на песчаном бугре сформировался ельник кустарничково-зеленомошный с проективным покрытием деревьев 70%, преобладает *Picea obovata* (60%), в примеси *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* (10%) (Таблица 2). Под ветками и между деревьями сформировался сплошной кустарничково-моховой покров. В кустарничковом ярусе (покрытие 10%) содоминируют *Vaccinium vitis-idaea* и *Empetrum hermaphroditum*. Моховой покров толстый, густой (60%) с доминированием *Pleurozium schreberi*, с меньшим обилием растут *Hylocomium splendens* и *Ptilidium ciliare*. Всего выявлено 43 вида. Альфа разнообразие в сообществе стало выше в основном за счет малообильных лишайников, мхов и псаммофильных трав. В частности, выявлены бореальные мхи *Ptilium crista-castrensis* и *Rhytidiadelphus triquetrus*.

Следует отметить сильно изменившийся за 23 года окружающий ландшафт – вокруг елового острова стало много молодых деревьев и подроста почти прямостоящей *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*.

Островок Е4 (N 67°54'37.5", E 54°03'11.8") расположен на водоразделе, на примыкающей к озеру песчаной котловине выдувания 130 м диаметром. Он состоит из 5-ти отстоящих друг от друга островков различной формы, приуроченных к внешним пологим и крутым бортам котловины. Самый большой островок площадью 25×17 м в свою очередь представлен 12 группами (клонами) тесно расположенных елей (Рис. 4а, ПЗ, П4). В 2000 г. в каждой группе было по ~15-50 очень сближенных

(расстояние между стволами 20-50 (70) см) невысоких тонкоствольных деревьев. Нижние укоренившиеся ветки по периферии клонов имели длину до 1.7 м при высоте дерева 1.8 м.



Рисунок 4а-г. Еловый островок Е4: **а** и **б** – 2000 г., вид с юго-западной стороны на большой островок (**а**) и с юго-восточной стороны на группу 7 (**б**); **в** и **г** – 2023 г., вид с тех же позиций.

В 2000 г. высота 8 измеренных деревьев в 7-ми группах варьировала от 1.2 до 4.0 м со средним значением 2.4 ± 0.4 м, диаметр стволов – от 2.9 до 14.0 см со средним значением 6.9 ± 1.4 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Наиболее высокие и толстоствольные деревья находились в группе 4 с южной стороны большого островка. В отдельно расположенной группе 7 ель имела преимущественно стланиковую форму роста с невысокими стволами, лишенными веток и хвои на большей своей части (Рис. 4б). Геоботаническое описание было сделано в границах большого островка (Таблица 2). В горизонтальной структуре было хорошо выражено фитогенное влияние групп елей на напочвенный покров. Из-за высокой сомкнутости деревьев группы внутри были мертвопокровными, по их периферии под нижними ветками елей сформирован кустарничково-моховой покров, а на полянках между группами – преимущественно кустарничковый с небольшим участием лишайников. Проективное покрытие *Picea obovata* составляло 30%, кустарничков (*Arctous alpina*, *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*) – 60%. Всего в островке было выявлено 43 вида, численно преобладали лишайники.

В 2023 г. высота 8 измеренных деревьев ели в этих же группах варьировала от 2.0 до 6.0 м со средним значением 3.8 ± 0.5 м, диаметр стволов – от 4.8 до 19.1 см со средним значением 9.6 ± 1.8 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Деревья значительно (в 1.5 раза) увеличились по высоте, что хорошо видно на фотоснимке, снятом с того же ракурса, что и 23 года назад (Рис. 4в). Часть групп в большом островке сомкнулись между собой, и стало трудно определить их границы. Елочки в группе 7, высота которых в 2000 г. не превышала 0.6 м (Рис. 4б), на текущий момент достигли 1.7 м высоты и жизнеспособность их значительно улучшилась, у многих форма кроны цилиндрическая с хорошо сформированной юбкой (Рис. 4г).

Несмотря на обилие мужских и женских шишек на ветках и прошлогодних шишек на земле, новых деревьев семенного происхождения в окружающем ландшафте не обнаружено. Ель по-прежнему активно размножается вегетативно укоренением нижних ветвей, особенно с южной стороны островка, защищенной от холодных северных ветров. Здесь отмечается густая стена из

молодых деревьев высотой от менее 0.5 м (еще приподнимающихся) до более 2.0 м (прямостоячих). Это способствует увеличению площади островка в южном направлении.

За 23 года покрытие *Picea obovata* в большом островке увеличилось в 2 раза – до 60%, также больше стало *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* (5%) и *Juniperus sibirica* (10%) (Таблица 2). Моховой покров вокруг групп елей довольно мощный (30%) с доминированием *Pleurozium schreberi* и меньшим обилием *Hylocomium splendens* и *Ptilidium ciliare*. На полянках очень сильно разрослась *Linnaea borealis*, почти полностью захватив все пространство вместе с *Empetrum hermaphroditum* и *Vaccinium vitis-idaea*. Поскольку к еловому островку примыкает песчаное обнажение, на периферии поселяются единичные псаммофильные травы. Всего выявлено 48 видов, альфа разнообразие сопоставимо с 2000 г.

В окружающем ландшафте стало много молодых прямостоящих деревьев и поросли *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*.

Островок Е7 (N 67°55'24.7", E 54°07'54.5") расположен на водоразделе на удалении 4.3 км на запад от р. Ортины и приурочен к высокому (~5 м высотой) песчаному бугру (17×30 м в поперечнике) с крутыми склонами и плоской вершиной, который окружен небольшой котловиной выдувания (Рис. П5, П6). В 2000 г. деревья росли по склонам бугра, превышая его высоту на 1.0-1.5 м (Рис. 5а и б). Высота 5 измеренных деревьев на склонах разных экспозиций варьировала от 1.4 до 5.0 м со средним значением 3.1 ± 0.7 м, диаметр стволов – от 5.0 до 13.2 см со средним значением 8.9 ± 1.6 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Форма роста и размеры деревьев сильно различались в зависимости от экспозиции склона. На северном склоне значительная площадь была занята елью стланиковой формы, тогда как с южной стороны высота деревьев достигала 5.0 м. На склонах в березово-еловом редколесье был сформирован кустарничково-зеленомошный покров, на плоской вершине – кустарничково-лишайниковая тундра с отдельными куртинами елового стланика. Геоботаническое описание сделано в пределах всего бугра (Таблица 2). Проективное покрытие *Picea obovata* оценено в 15%, *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* – 10%, кустарничков (*Arctous alpina*, *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*) – 40%. Всего в островке было выявлено 53 вида, численно преобладали лишайники. На вершине было старое зарастающее место от костра, вокруг которого росли антропофильные мхи *Ceratodon purpureus* и *Leptobryum pyriforme*, а также накипные лишайники *Vaeomycetes carneus*, *V. placophyllus*. На бугре устроены многолетние норы песцов со множеством отнорков.



Рисунок 5а-г. Еловый островок Е7: а и б – 2000 г., фото сделано с западной стороны, с островка Е6 (а) и вблизи (б); в и г – 2023 г., вид с тех же позиций.

В 2023 г. высота 5 измеренных стволов ели на тех же склонах варьировала от 2.5 до 6.0 м со средним значением 4.1 ± 0.7 м, диаметр стволов – от 5.1 до 19.1 см со средним значением 10.8 ± 2.3 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Высота деревьев увеличилась в среднем на 1 м, что хорошо видно при сравнении фотоснимков разных лет, где красной линией обозначена высота рядом стоящего человека (Рис. 5а и в). Жизненность ели спустя 23 года значительно увеличилась только на южном склоне, где под защитой бугра высокие деревья (до 6 м высотой) имеют пышные конусовидные кроны. Тогда как с северной стороны еловый стланик растет на том же самом месте, а деревца, хоть и подросли, но по-прежнему тонкие и чахлые. На восточном крутом склоне ели прямоствольные, ~3.5 м высотой, а на пологом западном – сформировался густой березняк. На плоской вершине бугра с кустарничково-лишайниковой тундрой стланик ели на площади 2 м² почти весь лишен хвои. На южном склоне и поныне много старых и свежих песцовых отторков.

За 23 года проективное покрытие *Picea obovata* увеличилось до 40%, а *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* – до 20%, стало больше *Juniperus sibirica* (~5 %) (Таблица 2). Под деревьями на склонах сформирован кустарничково-зеленомошный покров с доминированием *Vaccinium vitis-idaea* и *Pleurozium schreberi*. На вершине в кустарничково-лишайниковом сообществе доминируют *Empetrum hermaphroditum* и *Cladonia arbuscula*. Всего обнаружено 60 видов. Флористический состав в целом стабилен, его варьирование, по сравнению с 2000 г., связано в основном с единичными споровыми растениями.

Окружающий ландшафт сильно изменился, вокруг бугра на месте ерниковой тундры сформировался парковый березняк.

Островок **Е5** (N 67°56'09.7", E 54°02'48.0") расположен на остаточной морской террасе (пологое песчаное возвышение ~50 м диаметром), окруженной подковообразной старицей на правом берегу р. Ортины (Рис. П7, П8). В 2000 г. на этом фрагменте террасы было сформировано кустарничково-лишайниковое сообщество и росло несколько раскидистых искривленных деревьев *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*. Еловый островок занимал небольшую площадь на западном пологом склоне и состоял из 3-х отстоящих друг от друга групп низкорослых деревьев (Рис. 6а и б). Они имели юбку из нижних веток и узкопирамидальную или флаговую вершину, на высоте 1.0-1.2 м ветки отсутствовали (результат снеговой корразии).



Рисунок 6а-г. Еловый островок Е5: а и б – 2000 г., фото сделано с северной (а) и западной (б) стороны; в и г – 2023 г., вид с тех же позиций.

В 2000 г. в каждой более-менее выровненной по высоте группе было измерено по одному дереву. Высота варьировала от 2.6 до 3.3 м со средним значением 2.9 ± 0.2 м, диаметр стволов – от 5.5 до 6.2 см со средним значением 5.8 ± 0.2 см (Таблица 1, Рис. 2а и б).

Вокруг первой группы на возвышении был сформирован кустарничково-лишайниково-моховой покров с доминированием *Pleurozium schreberi*, вокруг ниже расположенных второй и третьей групп – ерник (1.0-1.2 м высотой) травяно-мохово-черничный. В нижней части склона островок граничит с заболоченным сообществом на берегу старицы. Геоботаническое описание сделано в границах всего островка (Таблица 2). Проективное покрытие *Picea obovata* оценено в 20%, *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* – 5%, *Betula nana* – 10%, кустарничков (доминировала *Vaccinium myrtillus*) – 30%. Всего в островке было выявлено 34 вида, численно преобладали травы с разной экологией. На ветках елей висели прошлогодние шишки.

В 2023 г. площадь елового островка составила 11.3×7.2 м. Группа 1 состоит из 26 сближенных стволов от 1.5 до 3.7 м высотой, одного срубленного на высоте 50 см и одного сухого (1 м высотой). Группа 2 состоит из 8 елей от 2.6 до 4.1 м высотой, группа 3 – из 9 елей от 2.9 до 4.0 м высотой. Все деревья тонкоствольные, с узкопирамидальной кроной, которая в группах 2 и 3 начинается на высоте ~1 м, с шишками прошлого и нынешнего года. Средняя высота 3-х измеренных деревьев в группах – 3.9 ± 0.1 м, диаметр стволов – 8.7 ± 0.4 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). За 23 года высота деревьев увеличилась в среднем на 1 м, улучшилась их жизненность, что хорошо видно при сравнении фотоснимков разных лет (Рис. 6а-г).

Проективное покрытие *Picea obovata* увеличилось до 65%, а *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* – до 10% (Таблица 2). Напочвенный покров в группах по-прежнему различается. В группе 1 он кустарничково (*Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*)-моховой с иван-чаем и хвощем; в группе 2 и 3 – кустарничково (*Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium myrtillus*, *V. uliginosum* subsp. *microphyllum*)-морозково-моховой. В кустарничковом ярусе в пределах всего острова изменились доминанты, чернику *Vaccinium myrtillus* вытеснила вороника *Empetrum hermaphroditum*. Всего обнаружено 47 видов, по числу видов преобладают травянистые растения и лишайники.

Прирост этого года на верхушках деревьев составил 10-12 см, на ветках – 7 см. Хвоя на центральной ветке держится 11 лет. В верхней части кроны много шишек прошлого года и зеленых.

Островок Е6 (N 67°55'23.0", E 54°07'46.7") расположен на водоразделе на краю небольшого (1.5 м высотой и 10 м диаметром) песчаного бугра (Рис. П6, П9) в 90 м на юго-запад от Е7. В 2000 г. он представлял собой одну группу из 8 деревьев примерно одинаковой высоты (3.5-4.5 м) и диаметра, у которых в нижней части стволов на высоте от 0.5 до 1.5 м отсутствовали ветки (Рис. 7а и б). Вокруг были одно деревце ~2 м и маленькие деревца 0.3–0.7 м высотой – это растущие вверх укоренившиеся ветки. Три из них были со сломанными верхушками и лишены коры, по-видимому, в результате воздействия оленей (они трутся рогами, когда сбрасывают с них кожу). В 2000 г. было измерено два дерева, средняя высота составила 4.2 ± 0.4 м, средний диаметр стволов – 12.3 ± 1.8 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Геоботаническое описание не делали, но отметили, что под группой елей сформирован травяно (*Festuca ovina*, *Lycopodium* sp.)-моховой (*Pleurozium schreberi*, *Dicranum* sp.) покров, а на бугре вокруг елей – кустарничково-травяно-лишайниковая тундра с *Betula nana* и *B. pubescens* subsp. *tortuosa*.

В 2023 г. в группе по-прежнему сохранилось 8 больших деревьев, вокруг которых растет одно деревце ~3 м и 8 – ~1 м высотой, а также многочисленные приподнимающиеся нижние ветки с прямостоячими верхушками (0.2-0.4 м высотой), уже перекрытые и отделенные от материнского дерева кустарничково-моховым покровом. Размеры елового островка (по нижним веткам) – 8.8×5.8 м. Средняя высота трех измеренных деревьев составила 6.1 ± 0.1 м, диаметр стволов варьировал от 12.7 до 18.8 см со средним значением 15.0 ± 0.7 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Деревья значительно (в 1.5 раза) увеличились по высоте, что хорошо видно на фотоснимке, снятом с того же ракурса, что и 23 года назад (Рис. 7а и в). Внутри группы напочвенный покров частично отсутствует (только хвоя), вокруг под внешними ветками – хорошо развитый кустарничково-моховой покров с доминированием *Vaccinium vitis-idaea*, *Arctous alpina*, *Linnaea borealis* и *Pleurozium schreberi* (Таблица 3). Число видов невелико – 20, т. к. площадь островка небольшая. Отмечено обилие мужских стробил на нижних ветках и маленьких деревьях.

Таблица 3. Видовой состав с обилием видов в еловых островках бассейна р. Ортины, описанных в 2023 г.

	Район	р. Ортина		
	Дата	21.07.2023	28.07.2023	23.07.2023
	Широта	67°55'23.0"	67°55'34.4"	67°55'53.0"
	Долгота	54°07'46.7"	54°11'06.1"	54°01'55.6"
Жизненная форма	Проективное покрытие (%), общее	100	100	100
	деревьев	80	90	80
	кустарников	<1	5	10
	кустарничков	20	20	25
	трав	5	5	30
	мохообразных	80	20	40
	лишайников	<1	<1	<1
	Число видов, всего	20	28	40
	деревьев	1	1	2
	кустарников	2	1	5
	кустарничков	3	4	4
	трав	5	11	18
	мохообразных	5	7	7
	лишайников	4	4	4
		Полевой номер елового островка	Е6	Е8	Е2
Константные виды кустарничково-зеленомошных ельников				
д	<i>Picea obovata</i>	5	5	5
к	<i>Juniperus sibirica</i>	r	1	2a
кч	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	2b	2b	2b
кч	<i>Linnaea borealis</i>	1	1	1
м	<i>Pleurozium schreberi</i>	4	2a	1
м	<i>Hylocomium splendens</i>	+	2a	2b
м	<i>Dicranum majus</i>	+	+	+
т	<i>Trientalis europaea</i>	+	.	+
м	<i>Sanionia uncinata</i>	1	.	+
л	<i>Cladonia fimbriata</i>	r	.	r
т	<i>Festuca rubra</i> subsp. <i>arctica</i>	.	r	+
т	<i>Tanacetum bipinnatum</i>	.	r	r
л	<i>Peltigera aphthosa</i>	.	+	r
Виды в реликтовых еловых островках на водоразделе				
кч	<i>Arctous alpina</i>	1	+	.
т	<i>Festuca ovina</i>	1	+	.
т	<i>Avenella flexuosa</i>	+	r	.
п	<i>Ptilidium ciliare</i>	+	2a	.
л	<i>Cladonia arbuscula</i>	+	r	.
к	<i>Betula nana</i>	+	.	.
т	<i>Calamagrostis neglecta</i>	+	.	.
т	<i>Rubus chamaemorus</i>	r	.	.
л	<i>Cladonia chlorophaea</i>	r	.	.
л	<i>C. gracilis</i> subsp. <i>elongata</i>	r	.	.
кч	<i>Empetrum hermaphroditum</i>	.	1	.
т	<i>Calamagrostis lapponica</i>	.	+	.
т	<i>Equisetum sylvaticum</i>	.	[+]	.
м	<i>Ceratodon purpureus</i>	.	r	.
м	<i>Pohlia nutans</i>	.	r	.
л	<i>Cladonia scabriuscula</i>	.	r	.
л	<i>C. stygia</i>	.	r	.
в том числе травянистые псаммофиты				
т	<i>Achillea millefolium</i>	.	r	.
т	<i>Antennaria dioica</i>	.	r	.
т	<i>Campanula rotundifolia</i>	.	r	.
т	<i>Hieracium alpinum</i>	.	+	.
т	<i>Juncus trifidus</i>	.	r	.
т	<i>Koeleria pohleana</i>	.	r	.
п	Liverwort	.	1	.

Продолжение Таблица 3.

Классификационная форма	Полевой номер елового островка	Е6	Е8	Е2
	Виды в долинном еловом островке			
д	<i>Betula pubescens</i> subsp. <i>tortuosa</i>	[+]	.	2a
т	<i>Equisetum pratense</i>	.	.	2a
т	<i>Adoxa moschatellina</i>	.	.	1
т	<i>Chamaenerion angustifolium</i>	.	.	1
м	<i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>	.	.	2b
к	<i>Lonicera pallasii</i>	.	.	+
кч	<i>Vaccinium myrtillus</i>	.	.	+
кч	<i>V. uliginosum</i> subsp. <i>microphyllum</i>	.	.	+
к	<i>Salix glauca</i>	.	.	+
к	<i>S. hastata</i>	.	.	г
к	<i>S. phylicifolia</i>	.	.	+
т	<i>Bistorta elliptica</i>	.	.	г
т	<i>B. vivipara</i>	.	.	г
т	<i>Bromopsis inermis</i>	.	.	г
т	<i>Carex quasivaginata</i>	.	.	+
т	<i>Delphinium elatum</i>	.	.	г
т	<i>Moehringia lateriflora</i>	.	.	г
т	<i>Orthilia obtusata</i>	.	.	г
т	<i>Solidago lapponica</i>	.	.	+
т	<i>Tephroses integrifolia</i>	.	.	г
т	<i>Valeriana wolgensis</i>	.	.	+
т	<i>Veratrum lobelianum</i>	.	.	г
т	<i>Viola biflora</i>	.	.	г
м	<i>Mnium spinosum</i>	.	.	г
м	<i>Sciuro-hypnum reflexum</i>	.	.	+
л	<i>Cladonia cornuta</i> subsp. <i>cornuta</i>	.	.	г
л	<i>C. sulphurina</i>	.	.	г

Примечание. В квадратные скобки взято обилие вида, растущего в непосредственной близости от островка.

Окружающий ландшафт вокруг островка за 23 года изменился (Рис. 7б и г), стало много *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*. В 2000 г. кроны берез были срезаны на высоте ~1 м (результат снеговой корразии), и лишь отдельные тонкие стволы поднимались выше, до 2.0-2.5 м. Сейчас это большие (3.5-4.0 м высотой) почти прямоствольные полностью облиственные деревья.



Рисунок 7а-г. Еловый островок Е6: а и б – 2000 г., фото вблизи (а) и вдаль, с вершины бугра с островком Е7 (б); в и г – 2023 г., вид с тех же позиций.



Рисунок 7а-г. Еловый островок Е6: **а** и **б** – 2000 г., фото волизи (**а**) и вдали, с вершины бугра с островком Е7 (**б**); **в** и **г** – 2023 г., вид с тех же позиций.

Островок Е8 (N 67°55'24.7", E 54°07'54.5") расположен на краю коренного берега руч. Быкшор на юго-западном склоне песчаного бугра, к которому с севера примыкает котловина выдувания (Рис. П10, П11). В 2000 г. островок состоял из одной группы тесно сближенных ~10 деревьев разного возраста (Рис. 8а). Несколько стволов были срублены, рядом находилось место от костра. Ели имели хорошо сформированные юбки из нижних ветвей (длиной более 2 м), выше которых на протяжении 1.0-1.5 м стволы были почти лишены веток, выше имели рыхлую или флаговую вершину. В нижнем ярусе росли кустарнички (*Vaccinium vitis-idaea*, *Arctous alpina*, *Empetrum hermaphroditum*) и *Festuca ovina*, рядом с островком – кусты можжевельника *Juniperus sibirica*. Высота деревьев варьировала от 3.2 до 5.5 м со средним значением 4.7 ± 0.6 , диаметр стволов – от 6.3 до 14.7 см со средним значением 11.4 ± 1.8 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Отмечено, что в долине ручья был сформирован ерник травянистый с примесью можжевельника и *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*.

В 2023 г. островок состоял из 8 больших елей в центре и ~20 более низких молодых – по периферии. Большие деревья многовершинные, у некоторых стволы почти от основания раздвоены, у молодых – дугообразные в нижней части (бывшие ветки). Высота 4 измеренных стволов ели варьировала от 3.6 до 7.2 м со средним значением 5.8 ± 0.9 , диаметр стволов – от 6.7 до 19.1 см со средним значением 14.0 ± 2.7 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Высота самых больших деревьев увеличилась на 1.5 м, их кроны стали более пышными, что хорошо видно при сравнении фотоснимков разных лет (Рис. 8а и б). Еловый остров внутри мертвопокровный (только хвоя и единичные побеги *Vaccinium vitis-idaea*), вокруг под нижними ветками сформирован кустарничково-моховой покров с доминированием *Vaccinium vitis-idaea*, *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens* и *Ptilidium ciliare* (Таблица 3). С южной стороны островок окружен густыми зарослями *Juniperus sibirica*. Видов всего – 28, включая единичные особи псаммофильных трав. Прирост этого года на боковых ветках ели составил 4-6 см, у молодых деревьев на верхушках – 10-20 см, с южной стороны – до 25 см. Хвоя на нижних ветках держится 14 лет.

За 23 прошедших года долина ручья и депрессия вокруг озера, из которого он берет начало, сильно «позеленели» за счет увеличения высоты и сомкнутости кустарничков (*Betula nana*, *Juniperus sibirica*, *Salix* spp.) и березы *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* (Рис. 8а и б).



Рисунок 8а и б. Еловый островок Е8: **а** – 2000 г., **б** – 2023 г., вид с той же позиции.

Островок ЕЗ (N 67°55'23.1", E 54°03'02.3") в 2000 г. был расположен на песчаном бугре (~5 м высотой и ~25 м диаметром) в центральной части обширной песчаной котловины выдувания южнее руч. Быкшор (Рис. 9а, П12, П13). Он состоял из 6-ти маленьких (1-2 м в поперечнике) групп елей, представленных в основном стлаником с единичными невысокими (менее 1 м) стволиками, на верхушках лишенными хвои (Рис. 9б). Одна группа находилась на верхней площадке размеров 3×5 м, а остальные располагались ступенчато на пологом юго-западном склоне. На вершине бугра и на склонах было много песцовых отнорков. На глубине больше 1 м от вершины прослеживался хорошо сформированный горизонт погребенного подзола. Высота 5-ти измеренных стволиков варьировала от 0.43 до 0.90 м со средним значением 0.7 ± 0.1 м, диаметр от 2.1 до 4.0 см, в среднем 3.1 ± 0.4 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Геоботаническое описание было выполнено в пределах бугра. Общее проективное покрытие составляло 65%, 45% приходилось на кустарнички (*Arctous alpina*, *Empetrum hermaphroditum*, *Salix nummularia*) и 20% – на псаммофильные травы (*Armeria scabra*, *Festuca ovina*, *Tanacetum bipinnatum* и др.), отмечены мох *Polytrichum piliferum* и единичные лишайники. Покрытие ели было оценено в 3%. Всего было выявлено 17 видов растений (Таблица 2). Активно происходили процессы дефляции и переноса песка.

В 2023 г. песчаный бугор оказался сильно разрушен, осталось пологое возвышение размером 16×13 м и высотой 1.5 м по сравнению с окружающим обнажением песка (Рис. 9в). Тем не менее, группы живого стланика ели и 1 ствол с хвоей на верхушке сохранились с западной и юго-западной стороны, куда преимущественно переносит песок (Рис. 9г). На северо-востоке, где была вершина бугра, осталась мертвая древесина. Здесь же отмечены фрагменты перевернутой дернины злаков (*Festuca* spp.). На почвенном разрезе на глубине 23-28 см обнаружен слой суглинка. По-видимому, он удерживает бугор от дальнейшего раздувания и способствует существованию ели. Высота единственного стволика с живой верхушкой – 1.2 м, диаметр – 4.0 см. Прирост этого года на ветках – 0.5 см. Общее проективное покрытие растительности составило 2%. Кроме ели, отмечены кустарничек *Salix nummularia* и единичные псаммофильные травы (*Festuca ovina*, *F. sabulosa*, *Koeleria pohleana* и др.), всего 10 видов (Таблица 2).



Рисунок 9а-г. Еловый островок ЕЗ: **а** и **б** – 2000 г., общий вид на песчаный бугор (**а**) и группы елей на ступенчатых склонах (**б**); **в** и **г** – 2023 г., вид с тех же позиций.

Крайнесеверный еловый остров в долине р. Ортины

Остров Е2 (N 67°55'53.0", E 54°01'55.6") находится на краю надпойменной террасы на левом берегу р. Ортины (Рис. П14). Это самый северный, изолированный от границы редколесий, еловый остров в долине реки. В 2000 г. он состоял из 17 больших деревьев до 8 м высотой и нескольких более молодых 2.5-4 м высотой (Рис. 10а, б). Несколько стволов были когда-то срублены на высоте 1.0-1.5 м и новые вершины образовались из боковых веток. У 6-ти измеренных деревьев высота варьировала от 5 до 8 м со средним значением 6.8 ± 0.6 м, диаметр стволов (на высоте 50 см) – от 16 до 25 см, в среднем 22.0 ± 1.7 см (Таблица 1, Рис. 2а и б). Напочвенный покров кустарничково (*Vaccinium vitis-idaea*)-травяно (*Adoxa moschatellina*, *Equisetum pratense*, *Valeriana wolgensis*, *Veratrum lobelianum*)-зеленомошный (*Hylocomium splendens*, *Rhytidiadelphus triquetrus*). Ельник был окружен березовым редколесьем с кустарниками *Juniperus sibirica* и *Salix* spp. Рядом с елями росли единичные особи жимолости *Lonicera pallasii* и рябины *Sorbus roodkovii*.

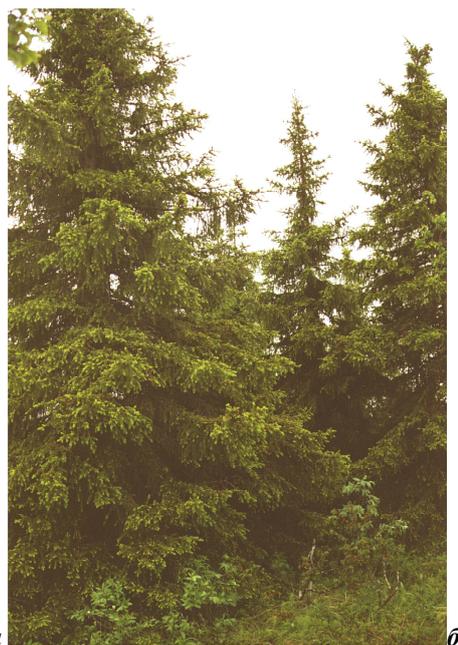


Рисунок 10а-г. Еловый островок Е2: **а** и **б** – 2000 г., фото с южной стороны; **в** и **г** – 2023 г., вид с тех же позиций.

В 2023 г. в острове просматриваются 3 группы елей из 13, 6 и 3 деревьев. Они достигают 9-10 м высоты, но есть и более низкие ~8 м (Рис. 10в и г). Деревья имеют пышные конусовидные кроны, ветки на стволах располагаются до самой земли (длина нижних – до 2.3 м), среди них есть

укоренившиеся по периферии острова. Средняя высота 5-ти измеренных стволов составила 9.6 ± 0.2 м при среднем диаметре (на высоте 50 см) – 25.7 ± 2.1 см. Хвоя на ветках держится 9 лет, на одной ветке был измерен прирост по годам, он равен 8.0, 5.0, 5.5, 5.0, 4.0, 4.0, 3.0, 5.0, 5.0 см. Покрытие ели в острове составило 80%, в примеси есть *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*, в кустарниковом ярусе – *Juniperus sibirica* и *Lonicera pallasii*. Напочвенный покров по-прежнему травяно-кустарничково-моховой, по обилию преобладают *Vaccinium vitis-idaea*, *Equisetum pratense*, *Hylocomium splendens* и *Rhytidiadelphus triquetrus* (Таблица 3).

К ельнику примыкают плотные заросли можжевельника *Juniperus sibirica* (до 2 м высотой) и ив (*Salix* spp.), через которые очень трудно пробираться, а далее он окружен высокотравным березняком из *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*. Березы (6-7 м высотой) в нижней части имеют очень толстые (20-25 см диаметром) искривленные стволы. Рябина *Sorbus gorodkovii* рядом с островом не обнаружена. Подрост и молодые деревья ели в окружающих сообществах не отмечены.

Крайнесеверный еловый остров на мысе Болванский Нос

Остров Е16 наиболее северный из обнаруженных нами на территории НАО (N $68^{\circ}17'19.0''$, E $54^{\circ}30'40.0''$) (Рис. П15). Он расположен в нижней половине юго-западного вогнутого склона сопки (высотой 25 м над ур. м.), сложенной легким суглинком. Ель в основном имеет форму стланика (приподнимающиеся ветки), растущего под защитой кустарников (*Betula nana* и *Salix glauca*) 50–70 см высотой (Рис. П16). В 2000 г. остров имел размеры 11×6 м, проективное покрытие *Picea obovata* было оценено в 30%, общее покрытие кустарников – 35% (Таблица 2). В верхней части склона над ярусом кустарников возвышались 6 стволиков ели, из которых лишь три имели зеленую хвою на верхушках, остальные были без хвои (Рис. 11а и б). Высота их варьировала в пределах 76-118 см со средним значением 91 ± 6.3 см, диаметр у основания – 2.4-7.2 см со средним значением 4.2 ± 0.9 см. Прямостоячие деревца были многовершинными, с «юбкой» из нижних ветвей. На концах некоторых веток отмечены галлы хермеса (Adelgidae). В моховом напочвенном покрове доминировали *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi*, кустарничковый ярус сложен *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum* subsp. *microphyllum* и *Linnaea borealis* (Таблица 2).

В 2014 г. ель характеризовалась высокой жизненностью: кроме приподнимающихся веток стланика насчитывалось 17 стволиков, все были живыми и полностью зелеными, с годичным приростом на концах веточек 2–3 см (Рис. 11в и г). Высота 6-ти самых высоких стволиков находилась в пределах 100-118 см со средним значением 108 ± 2.5 см, диаметр у основания – 3.9-8.6 см со средним значением 5.6 ± 1.1 см. Проективное покрытие *Picea obovata* увеличилось до 40% (Таблица 2). Весной прямо в «островке» была сделана охотничья засидка: ерник был частично вырублен и один стволик ели сломан.

В 2017 г. почти все прямостоячие деревца имели хвою лишь на верхушках, а в срединной части стволиков, выступающих поверх кустарников, она отсутствовала (следствие снеговой корразии) (Рис. 11д и е). На всех ветках хвоя прошлого года была окрашена в рыжий цвет.

В 2020 г. 9 наиболее высоких деревьев имели лишь зеленые «юбки», выше которых были лишены хвои и выглядели сухими (Рис. 11ж и з). В то же время часть стелющихся веток (>10 шт.) изменили рост с плагиотропного на ортотропный и имели высоту по уровню ерника и ивы. Высота 7-ми наиболее крупных из них (с хвоей по всему стволику) варьировала в пределах 52-80 см со средним значением 64 ± 4.6 см. Зеленые ветки *Picea obovata* стали активно расти в нижней части склона под защитой кустарников, увеличив размеры островка до 12×8 м. Как и в 2017 г. хвоя прошлого года имела рыжий цвет. За 20-летний период кустарничково-зеленомошный напочвенный покров в островке мало изменился. Проективное покрытие значимо выросло у ивы *Salix glauca*, кустарничка *Linnaea borealis* и злака *Calamagrostis lapponica* (Таблица 2).

В разные годы проективное покрытие *Picea obovata* варьировало в пределах 30–40%, число видов сосудистых и споровых растений находилось на уровне 40–48, площадь елового островка мало изменилась, женских шишек не наблюдали. В 2014 г. ветки одного деревца были густо усеяны мужскими стробилами. В целом, состояние ели в островке в 2020 г. было близким к 2000 г., а всплеск высокой жизненности наблюдался в 2014 г.



Рисунок 11а-з. Еловый островок Е16: а и б – 2000 г.; в и г – 2014 г.; д и е – 2017 г.; ж и з – 2020 г., вид с тех же позиций.

Состояние самой северной сосны в бассейне р. Ортины спустя 23 года

В 2000 г. на водоразделе (N 67°55'57.0", E 54°02'23.4") было обнаружено единственное маленькое (<70 см высотой) деревце сосны *Pinus sylvestris*, выросшей далеко на север от границы ареала (Рис. 12а и б). В 2023 г. его высота составила лишь 160 см из-за того, что за прошедший период оно неоднократно было сломано, по-видимому, оленями, которые трутся рогами (Рис. 12в и г). На высоте ~40 см много лет назад была сломана центральная вершина, позже сломаны 2 боковые ветки, которые начинали расти вертикально, взяв на себя функцию ствола, а в этом году сломана

верхушка еще у одной боковой ветки, которая тоже росла вертикально. Сейчас дерево имеет один растущий ствол с 14 мутовками, который подо мхами сливается со всеми сломанными стволами и имеет в основании общий диаметр 8 см. Прирост этого года на вершине составил 20 см, на боковых ветках – 4-7 см. Под деревом было обнаружено 6 шишек.



Рисунок 12а-г. Деревце сосны *Pinus sylvestris* в бассейне р. Ортины вдали от границы ареала, фото от 03.07.2020 г. (а и б) и от 23.07.2023 г. (в и г).

Тенденции изменений еловых островов и окружающих тундровых ландшафтов

В бассейне р. Ортины в реликтовых еловых островках на водоразделах (кроме исчезающего Е3) за 23 года средняя высота деревьев увеличилась на 1.1-1.9 м, т. е. средний прирост в высоту составил от 4.3 до 8.3 см в год. В более благоприятных микроклиматических условиях в долинном еловом острове (Е2) эти значения существенно выше – деревья в среднем выросли на 2.8 м, прирост составил 12.2 см в год.

В реликтовых островках за 23 года средний диаметр деревьев увеличился на 1.9-3.0 см, т. е. радиальный прирост составил от 0.41 до 0.65 мм в год. Близкие значения (0.63 мм) получены ранее В.С. Мазепой [Мазера, 1998] для ели, произрастающей в Большеземельской тундре и на Полярном Урале.

В самом северном долинном еловом острове Е2 средний диаметр деревьев увеличился на 3.7 см, т. е. радиальный прирост был существенно выше – 0.80 мм в год. Близкие значения ширины годичных колец получены для ели, растущей на юге Большеземельской тундры в бассейне р. Адзъва в урочище Пым-Ва-Шор, известном своими термальными источниками [Surso, Barzut, 2010]. У отдельных деревьев высотой 7-8 м они варьировали от 0.82 до 1.36 мм при среднем значении прироста 1.05 мм в год. Эти авторы предложили уравнение прямой зависимости высоты деревьев ели от возраста ($y = 1,836 + 0,120x$, $r = 0,822$), установив, что с возрастом темпы прироста в высоту не

замедляются. Если применить эту формулу к деревьям в еловом острове Е2 в долине р. Ортины, то их возраст составит 60-70 лет.

За 23 года не только значительно увеличилась высота и диаметр стволов ели в островах, но и изменилась форма их кроны. В реликтовых островках деревья преимущественно имели «юбки» из хорошо развитых нижних веток, а выше крона была цилиндрической или ствол был частично лишен веток и только вершины были зелеными. Сейчас крона у большинства деревьев стала конической или узкопирамидальной, с хорошо развитыми нижними ветками и в то же время с зелеными ветками по всему стволу. В долинном еловом острове Е2 конусовидные кроны деревьев стали более пышными.

Во всех изученных островах зарегистрировано вегетативное размножение ели с помощью укоренения нижних ветвей и изменения направления их роста с плагиотропного на ортотропный, особенно активное на склонах южных экспозиций. Молодые деревья разновозрастные, т.е. этот процесс идет постоянно, способствуя расширению площади отдельных групп елей и островов в целом. В то же время, несмотря на обилие и мужских и разновозрастных женских шишек, в окружающих ландшафтах не обнаружено подроста и отдельно стоящих молодых деревьев ели, что говорит об отсутствии семенного возобновления за 23 года. Еще советские геоботаники [Andreev, 1954; Norin, 1958] писали, что на водоразделах продвижение леса на север ограничивается недостаточностью доброкачественных семян для естественного воспроизводства деревьев. Такое же мнение высказали М.В. Сурсо и О.С. Барзут [Surso, Barzut, 2010], установив, что одной из основных причин, сдерживающих продвижение ели на север, является предел адаптационных возможностей ее генеративной сферы. Они показали, что для ели в урочище Пым-Ва-Шор характерно неполное вызревание семян. Индивидуальные значения абсолютной всхожести варьировали от 0 до 16.3%, при этом у 80% деревьев была отмечена нулевая всхожесть. Период прорастания семян оказался растянут до 35-40 дней.

Ценофлора кустарничково-зеленомошных ельников характеризуется стабильностью. Ядро видов, кроме *Picea obovata*, составляют *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*, кустарнички *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Linnaea borealis*, *Arctous alpina*, бриофиты *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens* и *Ptilidium ciliare*. В ярусе кустарников часто встречаются *Juniperus sibirica* и *Betula nana*. Наиболее активным постоянным травянистым растением является *Festuca ovina*. Изменения в составе видов за 23 года произошли за счет единичных, в основном споровых, растений.

Небольшой еловый островок Е3, занимающий песчаный бугор в центральной части котловины выдувания на водоразделе, отмирает и, по-видимому, со временем исчезнет из-за разрушения местообитания.

В тундровых ландшафтах, окружающих еловые островки в бассейне р. Ортины, наблюдаются значительные изменения, как на водоразделах, так и в долинах водотоков. Наиболее вероятной причиной этого может служить региональное потепление климата [Malkova et al., 2021; Lavrinenko et al., 2022]. На протяжении четверти века произошло и происходит активное внедрение в тундровые сообщества на водоразделах березы *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*, причем подрост и молодые деревья имеют прямоствольную форму роста от самого основания (Рис. 13). Многими авторами показано, что с начала XX в. в Уральских горах в формировании древостоев верхней границы леса также наблюдается возрастание участия березы [см. Grigor'ev et al., 2013]. Судя по сравнительным фотоснимкам, в долине р. Ортины и ее притоков кроме березы увеличилось покрытие и высота можжевельника, кустарниковых ив и особенно ольховника *Alnus fruticosa* (Рис. 8а и б, 14а и б).

На мысе Болванский Нос в еловом островке, расположенном севернее 68° с. ш., за прошедший 20-летний период отмечали как всплеск, так и падение жизненности ели. В 2020 г. ее состояние было близким к 2000 г. Результаты повторного обследования окружающих тундровых и болотных сообществ в связи с изменением климатических условий опубликованы нами ранее [Lavrinenko, Lavrinenko, 2022].



Рисунок 13. Внесение березы *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* в кустарничково-лишайниковые сообщества на песке рядом с еловым островом Е4, фото от 22.07.2023 г.



Рисунок 14а и б. Активное распространение *Betula pubescens* subsp. *tortuosa* и *Alnus fruticosa* по долине р. Ортины, фото с точки с координатами N 67°56'1.0", E 54°02'24.5" от 03.07.2020 г. (а) и от 25.07.2023 г. (б).

Граница островных еловых редколесий в долине р. Ортины по спутниковым снимкам

Еловые редколесья в долине р. Ортины распространены вдоль современного и старого русла реки и ее правых притоков, что хорошо демонстрируют результаты сегментации и классификации спутникового снимка от 11.08.2023 г. (Рис. 15). Редколесья имеют форму отдельных островов (а не непрерывной ленты), занимая возвышенные, вышедшие из затопления террасы на выпуклых участках меандрирующего русла. Площади выделенных островов (светло-зеленая заливка на рисунке) не превышают 0.1 км^2 . Сомкнутость ели в них составляет 0.3-0.5. Современная северная граница островных еловых редколесий в долине р. Ортины соответствует широте $67^{\circ}53'$.



Рисунок 15. Распространение еловых редколесий (светло-зеленой заливкой) в долине р. Ортины по отношению к словому островку E4 (снимок Sentinel 2A от 11.08.2023 г.)

На снимке Google Earth от 9.07.2004 г. все выделенные островные редколесья уже присутствовали на этих же самых позициях. Разрешение снимка от 11.08.2023 г. ($10 \times 10 \text{ м}$) не позволило нам выявить какие-либо изменения в сомкнутости деревьев в пределах островных редколесий и возможное продвижение отдельных деревьев или их небольших скоплений дальше на север. В Северной Америке есть опыт отслеживания распространения ели в бассейне р. Ноатак по зимним снимкам с высоким пространственным разрешением, что позволило увидеть продвижение на север даже отдельных деревьев, возвышающихся над снежным покровом [Dial et al., 2022]. Поскольку в распоряжении авторов подобные снимки отсутствуют, дистанционная оценка проведена только по редколесьям, занимающим площадь, соответствующую нескольким пикселям.

Расстояние от северной границы островных редколесий до крайнесеверного изолированного елового островка Е2 в долине р. Ортины составляет по прямой 5.2 км, а до реликтовых еловых островков на водоразделах – 3-6 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повторное, через 23 года, обследование наиболее северных еловых островков в долине р. Ортины на широте 67°54'-67°56' с. ш. позволяет утверждать, что жизнеспособность *Picea obovata* значительно улучшилась. Это выразилось в значимом увеличении высоты и диаметра стволов; изменении формы роста деревьев (была – юбочной, с флаговой вершиной или цилиндрической кроной, стала – конической, с зелеными ветками по всему стволу); увеличении площади отдельных групп и островков ели в результате вегетативного размножения с помощью укоренения нижних ветвей. В то же время, несмотря на обилие разновозрастных женских и мужских шишек, семенное возобновление отсутствовало; подрост и отдельно стоящие молодые деревья не обнаружены. На мысе Болванский Нос в крайнесеверном еловом островке, расположенном на широте 68°17' с. ш., за прошедший 20-летний период отмечали как всплеск (в 2014 г.), так и падение жизнеспособности ели, в 2020 г., как и в 2000 г., ее состояние было угнетенным.

Тезис, который был выдвинут на рубеже веков, о том, что островные ельники при потеплении климата станут трамплинами для внедрения деревьев ели в тундровые сообщества [Lavrinenko, Lavrinenko, 1999; 2004b], в настоящее время не подтверждается. Экспансия древесной растительности в тундровые сообщества на водоразделах активно происходит за счет *Betula pubescens* subsp. *tortuosa*, которая приобрела прямостоящую форму роста, а в долинах рек и ручьев, кроме того, за счет *Alnus fruticosa*.

В работе зафиксировано текущее состояние еловых островков на западе Большеземельской тундры, выполнены полные геоботанические описания и измерены морфометрические параметры деревьев, а также определено положение северной границы еловых редколесий в долине р. Ортины на спутниковом снимке. Это позволит осуществлять мониторинг и проследить при дальнейшем вероятном потеплении климата время смыкания границы еловых редколесий и островных ельников, расстояние между которыми сейчас совсем незначительное и составляет 3-6 км.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим О.М. Афонину (БИН РАН) за определение мхов. Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН по теме № 122041100242-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Andreev V.N. 1954. Promotion of woody vegetation into the tundra in connection with the protective properties of forest plantations in the North. *Botanic Journal*, 39(1):28-47. (In Russian). [Андреев В.Н. 1954. Продвижение древесной растительности в тундру в связи с защитными свойствами лесопосадок на Севере // Ботанический журнал. Т. 39. № 1. С. 28-47].

Andreev V.N. 1956. Population of the tundra by forest in the modern era. In: *Vegetation of the Far North of the USSR and its development*. V.1. pp. 27-45., Publishing House of the USSR Academy of Sciences. Moscow. (In Russian). [Андреев В.Н. 1956. Заселение тундры лесом в современную эпоху // Растительность крайнего севера СССР и ее освоение. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР. С. 27-45].

Andreicheva L.N. 2002. Pleistocene of the European Northeast. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 321 pp. (In Russian). [Андреичева Л.Н. 2002. Плейстоцен европейского Северо-Востока. Екатеринбург: УРО РАН, 321 с.

Becking R. 1957. The Zürich-Montpellier school of phytosociology. *The Botanical Review*. Vol. 23. N 7. pp. 411-488.

Bolotov I.N., Surso M.V., Filippov B.YU., Gofarov M.YU., Tarakanov A.M. 2012. Changes in tree stands on isolated forest islands in the east of Bolshezemelskaya tundra for the last 100 years in a changing climate. *Russian forestry journal*. 5: 329. pp. 30-37 (In Russian). [Болотов И.Н., Сурсо М.В., Филиппов Б.Ю., Гофаров М.Ю., Тараканов А.М. 2012. Изменения древостоев в изолированных лесных островах востока Большеземельской тундры за последние 100 лет в условиях меняющегося климата // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. № 5(329). С. 30-37].

- Callaghan T.V., Werkman B.R., Crawford R.M.M. 2002. The tundra-taiga interface and its dynamics: concepts and applications. *Ambio Special Report*. 12: 6-14.
- Development of landscapes and climate of Northern Eurasia. Late Pleistocene – Holocene; Forecast elements. 1993.(A.A. Velichko), Vol.1. pp. 102. Nauka, Moscow. (In Russian). [Развитие ландшафтов и климата Северной Евразии. Поздний плейстоцен – голоцен; Элементы прогноза. 1993. / Под ред. А.А. Величко/. М.: Наука. Вып. 1. 102 с.]
- Dial R.J., Maher C.T., Hewitt R.E., Sullivan P.F. 2022. Sufficient conditions for rapid range expansion of a boreal conifer. *Nature*. Vol. 608. pp. 546-551. DOI:10.1038/s41586-022-05093-2
- Druckenmiller M.L., Moon T., Thoman R. 2021. The Arctic / State of the Climate in 2020. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 102(8): 263-315. DOI:10.1175/BAMS-D-21-0086.1
- Grigor'ev A.A., Devi N.M., Kukarskikh V.V., V'yukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V. 2019. Structure and dynamics of tree stands at the upper timberline in the western part of the Putorana plateau. *Russian Journal of Ecology*. 50 (4): 311-322. (In Russian). [Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. 2019. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. № 4. С. 243-254] DOI: 10.1134/S0367059719040073
- Grigor'ev A.A., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y. 2013. Dynamics of the timberline in high mountain areas of the Nether-Polar Urals under the influence of current climate change. *Russian Journal of Ecology*. 44 (4): 284-295. (In Russian). [Григорьев А.А., Моисеев П.А., Нагимов З.Я. 2013. Динамика верхней границы древесной растительности в высокогорьях Приполярного Урала под влиянием современного изменения климата // Экология. № 4. С. 284-295]. DOI:10.7868/S0367059713040069
- Grisebach A. 1872. Die Vegetation der Erde nach ihrer klimatischen Anordnung., Ein Abriss der vergleichenden Geographie der Pflanzen. Leipzig. Vol. I. 27 pp.
- Hansson A. 2022. Understanding treeline migration in response to modern climate change: Where is it happening, how are we measuring it, and what are the implications? Thesis PhD. The University of Queensland, Australia. 217 pp.
- Harris J.A., Hollister R.D., Botting T.F., Tweedie C.E., Betway K.R., May J.L., Barrett R.T.S., Leibig J.A., Christoffersen H.L., Vargas S.A., Orejel M., Fuson T.L. 2021. Understanding the climate impacts on decadal vegetation change in northern Alaska. *Arctic Science*. 00: 1–21 (0000). DOI:10.1139/as-2020-0050
- Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Duncan R.P. 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecol. Lett.* 12: 1040-1049. DOI:10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x
- Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A., Abolina A., Akatova T.V., Baisheva E.Z., Bardunov L.V., E.A. Baryakina, O.A. Belkina, A.G. Bezgodov, M.A. Boychuk, V.Ya. Cherdantseva, I.V. Czernyadjeva, G.Ya. Doroshina, A.P. Dyachenko, V.E. Fedosov, I.L. Goldberg, E.I. Ivanova, I. Jukoniene, L. Kannukene, S.G. Kazanovsky, Z.Kh. Kharzinov, L.E. Kurbatova, A.I. Maksimov, U.K. Mamatkulov, Manakyan V.A., Maslovsky O.M., Napreenko M.G., Otnyukova T.N., Partyka L.Ya., Pisarenko O.Yu., Popova N.N., Rykovsky G.F., Tubanova D.Ya., Zheleznova G.V., Zolotov V.I. 2006. Check-list of mosses of East Europe and North Asia. *Arctoa*. 15: 1-128.
- Kharuk V.I., Im S.T., Ranson K.J., Sun G. 2005. High resolution satellite images in the forest tundra ecotone dynamics analysis. *Exploration of the Earth from Space*. 6: 46-55. (In Russian). [Харук В.И., Им С.Т., Рэнсон К.Дж., Сан Г. 2005. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры // Исследование земли из космоса. № 6. С. 46-55].
- Kruse S., Gerdes A., Kath N.J., Epp L.S., Stoof-Leichsenring K.R., Pestrya-kova L., Herzs Schuh U. 2019. Dispersal distances and migration rates at the arctic treeline in Siberia – a genetic and simulation based study. *Biogeosciences*. 16: 1211-1224. DOI:10.5194/bg-16-1211-2019
- Lavrinenko I.A. and Lavrinenko O.V. 1999. Relict spruce forest 'islands' in the Bolshezemelskaya tundra – control sites for long-term climatic monitoring. *Chemosphere*. 1(4): 389-402.
- Lavrinenko O.V. and Lavrinenko I.A. 2022. Twenty-one year dynamics of vegetation from long-term plots in East European tundra. *Environmental dynamics and global climate change*. 13(2): 70-103. DOI:10.18822/edgcc109513
- Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A. 2003. Spruce islands of the East European Tundra. *Botanical journal*. 88 (8): 59-77. (In Russian). [Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. 2003. Островные ельники восточно-европейских тундр // Ботанический журнал. Т. 88. № 8. С. 59-77].
- Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A. 2004a. Clonal structure and variability of Siberian Spruce (*Picea Obovata* Ledeb.) in isolated populations at the very north limit of habitat. *Siberian Journal of Ecology*. 11 (2): 179-190. (In Russian). [Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. 2004а. Клональная структура и изменчивость ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в изолированных популяциях на самом северном пределе распространения // Сибирский экологический журнал. Т. 11. № 2. С. 179-190].
- Lavrinenko O.V., Lavrinenko I.A. 2004b. Phytoindication of climate change in the North-East of the European part of Russia. *Geography and Natural Resources*. 2: 54-61. (In Russian). [Лавриненко О.В., Лавриненко И.А. 2004б. Фитоиндикация изменений климата на Северо-Востоке европейской части России // География и природные ресурсы. № 2. С. 54-61].
- Lavrinenko O.V., Petrovskiy V.V., Lavrinenko I.A. 2019. New local floras and materials for floristic subdivision of the East European Tundra. *Botanical journal*. 104 (1): 58-92. (In Russian). [Лавриненко О.В., Петровский В.В., Лавриненко И.А. 2019. Новые локальные флоры и материалы к флористическому районированию восточноевропейских тундр // Ботанический журнал. Т. 104. № 1. С. 58-92]. DOI: 10.1134/S0006813619010083
- Lavrinenko O.V., Tyusov G.A., Petrovsky V.V. 2022. Impact of climate warming on floristic diversity of the East European tundra // *Environmental dynamics and global climate change*. 13(1): 35-48. DOI:10.18822/edgcc101643
- Maher C., Dial R., Pastick N.J., Hewitt R.E., Jorgenson M.T., Sullivan P.F. 2021. The climate envelope of Alaska's northern treelines: implications for controlling factors and future treeline advance. *Ecography*. 44: 1710-1722. DOI:10.1111/ecog.05597
- Malkova G.V., Korostelev YU.V., Skvortsov A.G., Sudakova M.S., TSarev A.M. 2021. Geocryological consequences of modern climate changes – results of comprehensive monitoring at geocryological stations in the Nenets Autonomous Okrug. In: *Materials of the All-Russian scientific and technical conference "Comprehensive study and development of the subsoil of the European North of Russia - 2021" (Ukhta, September 16–17, 2021)*. pp. 167-173. (In Russian). [Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Скворцов А.Г., Судакова М.С., Царев А.М. 2021. Геокриологические последствия современных климатических изменений – результаты комплексного мониторинга на геокриологических стационарах в Ненецком автономном округе // Мат-лы

- всеросс. науч.-техн. конф. «Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России – 2021» (Ухта, 16–17 сентября 2021 г.). С. 167-173].
- Mazepa V.S. 1998. Spatiotemporal variability of radial growth of coniferous tree species in the subarctic regions of Eurasia: Abstract dis. Doctor of biol. sciences. Ekaterinburg. 38 pp. (In Russian). [Мазепа В.С. 1998. Пространственно-временная изменчивость радиального прироста хвойных видов деревьев в субарктических районах Евразии: Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Екатеринбург. 38 с.]
- Moiseev P.A., Galimova A.A., Bubnov M.O., Fomin V.V., Terskaya A.I. 2019. Tree stand dynamics at the upper treeline on the Kola Peninsula in the last century. In: *Abstract report VII All-Russian Scientific Conference with international participation "Ecological problems of the northern regions and ways to solve them" (Apatity, June 16–22, 2019)*. Apatity. Publishing house Kola Science Centre RAS. [Моисеев П.А., Галимова А.А., Бубнов М.О., Фомин В.В., Терская А.И. 2019. Динамика древостоев на верхнем пределе их произрастания на Кольском полуострове в последнем столетии // Тез. докл. VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (Апатиты, 16–22 июня 2019 г.). Апатиты: Изд-во Кольский НЦ РАН. С. 187-188].
- Norin B.N. 1958. Towards the knowledge of seed and vegetative regeneration of tree species in the forest-tundra. *Vegetation of the Far North of the USSR and its development*. М.; Л.: Publishing house of the USSR AS. 3: 154-244. (In Russian). [Норин Б.Н. 1958. К познанию семенного и вегетативного возобновления древесных пород в лесотундре // Растительность Крайнего Севера СССР и ее освоение. М.; Л.: Изд-во АН СССР. Вып. 3. С. 154-244].
- Oberbauer S.F., Elmendorf S.C., Troxler T.G., Hollister R.D., Rocha A.V., Bret-Harte M.S., Dawes M.A., Fosaa A.M., Henry G.H.R., Hoyer T.T., Jarrad F.C., Jonsdottir I.S., Klanderud K., Klein J.A., Molau U., Rixen C., Schmidt N.M., Shaver G.R., Slider R.T., Totland O., Wahren C.-H., Welker J.M. 2013. Phenological response of tundra plants to background climate variation tested using the International Tundra Experiment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*. 368(1624): UNSP 20120481. DOI:10.1098/rstb.2012.0481
- Paulsen J. and Körner C. 2014. A climate-based model to predict potential treeline position around the globe. *Alpine Botany*. 124: 1-12.
- Potemkin A.D., Sofronova E.V. 2009. Liverworts and hornworts of Russia. Vol. 1. St. Petersburg – Yakutsk. 368 pp. (In Russian). [Потемкин А.Д. и Софронова Е.В. 2009. Печеночники и антоцеротовые России. Т. 1. Санкт-Петербург – Якутск. 368 с.]
- Quaternary glaciations on the territory of the USSR. 1987. (A.A. Velichko and others). Moscow. Nauka. 128 pp. (In Russian). [Четвертичные оледенения на территории СССР./ Под ред. А.А. Величко и др./ 1987. М.: Наука. 128 с.]
- Rees W.G., Hofgaard A., Boudreau S., Cairns D.M., Harper K., Mamet S., Mathisen I., Swirad Z., Tutubalina O. 2020. Is subarctic forest advance able to keep pace with climate change? *Global Change Biology*. 26: 3965–3977. DOI:10.1111/gcb.15113
- Rusanova G.V., Deneva S.V. 2006. Soils of relic spruce (*Picea obovata* Ledeb.) forest islands in northwestern Bol'shezemel'skaya Tundra. *Lesovedenie*. 2: 21-25. (In Russian). [Русанова Г.В. и Денева С.В. 2006. Почвы реликтовых островков ели на северо-западе Большеземельской тундры // Лесоведение. № 2. С. 21-25].
- Santesson R., Moberg R., Nordin A., Tønberg T., Vitikainen O. 2004. Lichenforming and lichenicolous fungi of Fennoscandia. Museum of Evolution. Uppsala University. 359 pp.
- Schuur E.A.G., Crummer K.G., Vogel J.G., Mack M.C. 2007. Plant species composition and productivity following permafrost thaw and thermokarst in Alaskan tundra. *Ecosystems*. 10(2): 280–292. DOI:10.1007/s10021-007-9024-0
- Секретарева Н.А. 2004. Вascular plants of the Russian Arctic and adjacent territories. Moscow. 131 pp. (In Russian). [Секретарева Н.А. 2004. Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий. М. 131 с.]
- Shiyatov S.G. 1976. Secular variability in the growth of Siberian spruce in the lower reaches of the river Pechory. *Forestry, forestry: Abstracts report VII Symposium "Biological Problems of the North"*. Petrozavodsk pp. 224-225. (In Russian). [Шиятов С.Г. 1976. Вековая изменчивость прироста ели сибирской в низовье р. Печоры // Лесоведение, лесоводство: Тез. докл. VII симпозиума «Биологические проблемы Севера». Петрозаводск. С. 224-225].
- Shiyatov S.G. 1981. Climatogenic changes in forest vegetation at the upper and polar limits of its growth: Abstract dis. Doctor of biol. sciences. Sverdlovsk. 57 pp. (In Russian). [Шиятов С.Г. 1981. Климатогенные смены лесной растительности на верхнем и полярном пределе ее произрастания: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Свердловск. 57 с.]
- Shiyatov S.G. 2009. Dynamics of woody and shrub vegetation in the Polar Urals under the influence of current climate changes. Ekaterinburg. 219 pp. (In Russian). [Шиятов С.Г. 2009. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург. 219 с.]
- Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Grigor'ev A.A. 2020. Photomonitoring of tree and shrub vegetation in the highlands of the Southern Urals over the past 100 years. Ekaterinburg. 191 pp. (In Russian). [Шиятов С.Г., Моисеев П.А., Григорьев А.А. 2020. Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет. Екатеринбург. 191 с.]
- Shiyatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V., Tsimmermann N.E. 2007. Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century. *Russian Journal of Ecology*. 38 (4): 223-227.
- Surso M.V., Barzut O.S. The growth and morphology peculiarities of coniferous in Bolshezemel'skaya Tundra. Spuce in Рум-Ва-Шор area. *Forestry bulletin*. 5: 42-48. (In Russian). [Сурсо М.В., Барзут О.С. 2010. Особенности роста и развития хвойных в Большеземельской тундре. Ель в урочище Пым-Ва-Шор // Лесной вестник. № 5. С. 42-48].
- Timofeev A.S., V'yukhin S.O., Grigor'ev A.A., Moiseev P.A. 2021. Structure and dynamics of larch stands in the upper part of the mountain-forest belt of the massif dry mountains (Putorana Plateau). Forests of Russia and economy in them. 1 (76): 23-28 (In Russian). [Тимофеев А.С., Вьюхин С.О., Григорьев А.А., Моисеев П.А. 2021. Структура и динамика древесной и кустарниковой растительности на верхнем пределе своего произрастания на плато Путорана // Леса России и хозяйство в них. № 1(76). С. 23-28].
- Yudin Yu. P. 1954. Forests. *Productive forces of the Komi ASSR*. Vol. III. Part 1. Flora. pp. 45-48. (In Russian). [Юдин Ю.П. 1954. Леса // Производительные силы Коми АССР. Т. III. Ч. 1. Растительный мир. С. 45-48].
- A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2022. М. 104 pp. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. 2023. М. 104 с. URL. <https://meteoinfo.ru/images/media/climate/rus-clim-annual-report.pdf> (дата обращения: 01.12.2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ



П. Рисунок 1. Еловый островок E1 на периферии заросшего песчаного обнажения на коренном берегу р. Ортины; фото с БПЛА.



П. Рисунок 2. Еловый островок E1, 1-7 – номера групп, где выполнены измерения высоты и диаметра деревьев; спутниковый снимок Google Earth от 09.07.2004 г.



II. Рисунок 3. Еловый островок Е4 на внешних склоенных бортах песчаной котловины выдувания на водоразделе вблизи озера; фото с БПЛА.



II. Рисунок 4. Еловый островок Е4, 1-7 – номера групп, где выполнены измерения высоты и диаметра деревьев; спутниковый снимок Google Earth от 09.07.2004 г.



II. Рисунок 5. Еловый островок E7 на песчаном бугре на водоразделе; фото с БПЛА.



II. Рисунок 6. Еловые островки E6 и E7 на водоразделе; спутниковый снимок SAS Planet (после 2014 г.).



П. Рисунок 7. Еловый островок E5 на остаточном фрагменте морской террасы, окруженной подковообразной старицей; фото с БПЛА.



П. Рисунок 8. Еловый островок E5, 1-3 – номера групп, где выполнены измерения высоты и диаметра деревьев; спутниковый снимок Google Earth от 09.07.2004 г.



П. Рисунок 9. Еловый островок Е6 на краю небольшого песчаного бугра на водоразделе; фото с БПЛА.



П. Рисунок 10. Еловый островок Е8 на краю небольшого песчаного бугра; фото с БПЛА.



П. Рисунок 11. Еловый островок Е8; спутниковый снимок SAS Planet (после 2014 г.).



П. Рисунок 12. Остатки елового островка Е3 на песчаном возвышении посреди котловины выдувания; фото с БПЛА в 2023 г.



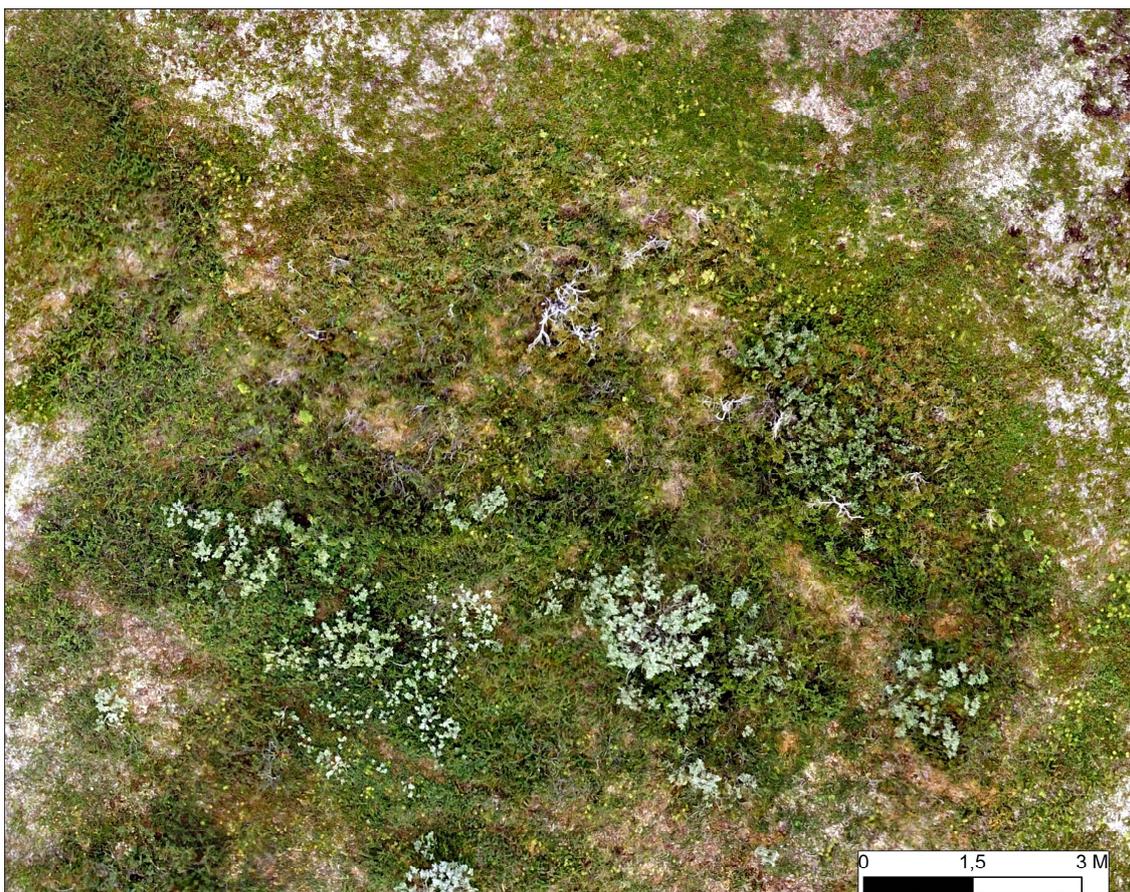
П. Рисунок 13. Еловый островок E3; спутниковый снимок Google Earth от 09.07.2004 г.



П. Рисунок 14. Еловый островок E2 и рядом еще один безымянный; спутниковый снимок Google Earth от 09.07.2004 г.



П. Рисунок 15. Еловый островок E16 на мысе Болванский Нос; спутниковый снимок SAS Planet (после 2014 г.).



П. Рисунок 16. Еловый островок E16 на склоне сопки на мысе Болванский Нос (видны сухие стволы ели в верхней части склона), фото с БПЛА в 2020 г.

Поступила в редакцию: 17.01.24
Переработанный вариант: 13.05.2024

PHYTOMASS CARBON POOLS OF KOIVULAMBISUO MIRE SYSTEM (SOUTH KARELIA)

*Kutenkov S.A.**, *Kuznetsov O.L.*, *Kantserova L.V.*, *Mironov V.L.*, *Ignashov P.A.*,
Talbonen E.L., *Vasyuta V.S.*

Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

**effort@krc.karelia.ru*

Citation: Kutenkov S.A., Kuznetsov O.L., Kantserova L.V., Mironov V.L., Ignashov P.A., Talbonen E.L., Vasyuta V.S. 2024. Phytomass carbon pools of Koivulambisuo mire system (South Karelia). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(1): 68-73.

DOI: 10.18822/edgcc635207

Для трех типов болотных участков среднетаежной подзоны Карелии: аапа, верховых сфагновых грядово-мочажинных и верховых сосново-кустарничково-пушицево-сфагновых определены запас и первичная годовичная аккумуляция углерода в фитомассе.

Ключевые слова: Средняя тайга, болотные участки, фитомасса, запас углерода, годовичная продукция

Koivulambisuo mire system (61,80° N, 33,56° E, middle taiga subzone) has a complex structure of vegetation cover, includes south Karelian variant of aapa mires, raised bogs, transitional herb-sphagnum fens and forested sites of different trophic levels. The study was carried out within the framework of the National system for monitoring carbon pools and greenhouse gas fluxes in Russia. Phytomass and carbon pools were determined for three types of mire sites: aapa, ridge-hollow sphagnum bog and oligotrophic pine-dwarf shrub-cotton grass-sphagnum.

On each type of mire sites, 3 sample plots 50x50 m in size with 8–12 sampling points were set up. Tree stand was estimated by the total count and basic measurements of all standing trees on plots, whereas production of needles and branches was defined by the model tree method. The phytomass material of the above-ground vascular plants was collected by the cutting method. The collection of mosses and underground phytomass was done by monoliths method. The production of sphagnum mosses was estimated by annual increment method.

Aapa mire is extremely poorly afforested, to the least extent among the studied sites, due to strong watering and poor development of strings. The total carbon pool in a forest stand is only 0.01 tC/ha. The carbon pool in the above-ground phytomass of aapa complexes is also minimal – 2.56 tC/ha. It is mainly provided by sphagnum mosses, while herbs and shrubs contain half as much carbon in total. Living underground phytomass deposits 21.56 tC/ha (89% of the total phytomass). Such a high carbon sequestration by living underground plant organs is a feature of aapa sites and is associated with favorable regime of water movement. Some overestimation is also possible due to the difficulty of separating living and dead tightly intertwined roots. The mortmass of a 40 cm surface layer of peat soil contains 38.71 tC/ha, most of it in the sphagnum remains. The annual ground cover production of aapa is minimal: 1.55 tC/ha, which is caused by the development of extensive flarks with sparse vegetation cover. Unlike other sites, the role of vascular plants is higher here (0.68 tC/ha) due to the predominance of herbaceous plants in cover.

The afforestation degree of ridge-hollow bogs varies; the living forest stand of the most afforested sites is contains 0.31 tC/ha, while in the other two, more watered sites, the pool is less than 0.02 tC/ha. The average carbon stock in a tree stand is 0.11 tC/ha. The carbon pool in the ground cover of the ridge-hollow bogs is maximum among the studied mire sites (4.25 tC/ha), the main share in it is sphagnum mosses (3.52 tC/ha), while grasses and shrubs 0.73 tC/ha. Living underground phytomass deposits 8.62 tC/ha (66% of the total phytomass). The mortmass of a 40 cm surface layer of peat soil contains, on average, 61.77 tC/ha, most of it in the sphagnum remnants. In cotton grass-sphagnum hollows the stock reaches 80.09 tC/ha due to dense cotton grass tussocks. The above-ground vascular plants annual production is 0.48 tC/ha (the minimum among the studied mire site types) and 1.56 tC/ha by mosses.

Pine-dwarf shrub-cotton grass-sphagnum plots have the most developed forest stands among the studied mire sites. The average tree height here is 1-2 m, whereas individual trees reach a 5-6 m. The carbon pool in the living tree stand and the dead wood is 2.92 tC/ha and 1.66 tC/ha, respectively. In addition, the forest stand contribution to the total living phytomass carbon stock is maximum and equal to moss stock. The ground cover deposits 4.46 tC/ha, besides sphagnum mosses (2.9 tC/ha), a significant stock in dwarf shrubs (1.11 tC/ha). Living underground phytomass deposits 9.04 tC/ha (56% of the total phytomass). The mortmass of a 40 cm surface layer of peat soil contains 63.43 tC/ha. The total contribution of pine needles and branches to the annual production is 0.04 tC/ha. The above-ground phytomass here also demonstrates the maximum annual production – 2.21 tC/ha per year, mainly provided by sphagnum mosses (1.64 tC/ha).

In general, the main living phytomass carbon pools of mire sites are concentrated in the underground parts of vascular plants. The ground cover main stock is in sphagnum mosses. Significant carbon stock in the tree stands only

has pine-cotton grass-dwarf shrub-sphagnum sites, where it equal to the carbon stock of mosses. In all types of sites, carbon pool in the mortmass of the upper 40 cm of the deposit are noticeably higher than the total reserves in living phytomass. The main part of the mortmass consists of the sphagnum mosses remains. Mosses are also characterized by the largest primary annual production of carbon.

Key words: Middle taiga subzone, mire sites, phytomass, carbon stock, annual production

Принятые сокращения и обозначения

БГЦ – биогеоценоз, согласно [Metodicheskie..., 2023]
ГМК – верховые грядово-мочажинные комплексы
ГП – годовичная продукция
ПП – пробная площадь 50x50 м
СКС – верховые сосново-кустарничково-пушицево-сфагновые участки
ТКЯ – травяно-кустарничковый ярус
ТО – точка отбора 40x40 см

ВВЕДЕНИЕ

Бореальные болота играют важную роль в углеродном цикле, являясь эффективным поглотителем CO₂ и представляя собой один из крупнейших резервуаров углерода. Основной причиной этого является небольшое положительное соотношение между фотосинтетической фиксацией CO₂ из атмосферы растениями и последующим возвратом в нее CO₂, выдыхаемого растениями и образующегося в результате деятельности микроорганизмов и грибов. Считается, что в глобальном масштабе до 10% органического материала переходит в торф и удерживается в нем на тысячелетия [Joosten, Clarke, 2002]. Однако, на локальном уровне, в зависимости от конкретных условий среды, разные типы болот могут как накапливать, так и активно терять углерод [Pyasov et al., 2023]. Исходным звеном в накоплении углерода болотами являются растения, и объективная оценка запасов углерода требует изучения растительного покрова на болотных участках с различающимися экологическими условиями. Исследования фитомассы различных типов болотных участков ранее проводились в Карелии [Elina et al., 1984], однако содержание углерода в них не оценивалось. В этой связи здесь мы ставим целью оценить запасы и первичную годовичную продукцию углерода в фитомассе трех контрастных типов болотных участков среднетаежной подзоны Карелии: аапа, верховых сфагновых грядово-мочажинных и верховых сосново-кустарничково-пушицево-сфагновых. Данные были получены лабораторией болотных экосистем ИБ КарНЦ РАН в 2023 году в рамках работы по проекту «Оценка пулов углерода в болотных экосистемах и агроландшафтах Республики Карелия, создание мониторинговой системы для измерения потоков углерода в агроландшафтах региона» в пределах модельной болотной системы Койвуламбисуо (южная Карелия).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследований. Болотная система Койвуламбисуо площадью 1875 га (61,80° с.ш., 33,56° в.д., подзона средней тайги) входит в состав лесоболотного научного стационара Карельского научного центра РАН «Киндасово» и охраняется в ранге регионального болотного заказника. Она состоит из двух слившихся болот – Неназванное и Мустусуо, имеет сложную структуру растительного покрова и включает болотные массивы южнокарельского варианта аапа болот, грядово-мочажинные верховые массивы, а также переходные травяно-сфагновые и облесенные участки разной трофности [Elina, 1977; Elina et al., 2005].

Кочковато-грядово-топяные мезоевтрофные аапа комплексы приурочены к транзитной топи болота Неназванное шириной до 0,4 км, простирающейся с севера на юг на 1,6 км. Сфагновые кочки диаметром 1–5 метров занимают 20–30%, состоят преимущественно из *Sphagnum papillosum*, реже *S. angustifolium*, *S. divinum*. Преобладают топяные участки с редким травяным ярусом, иногда также гипновыми мхами (*Scorpidium scorpioides*, *Warnstorfia exannulata*) и слоем воды 10–50 см. В ТКЯ аапа комплексов преобладают *Andromeda polifolia*, *Carex lasiocarpa*, *C. limosa*, *Menyanthes trifoliata*, *Rhynchospora alba*, *Scheuchzeria palustris*, *Trichophorum alpinum*, *Utricularia intermedia*.

ГМК представлены на массивах по восточному краю болота Неназванное и на болоте Мустусуо. Они относятся к среднекарельскому типу верховых болот [Yurkovskaya, 1992] и несколько

различаются между собой по степени развитости и увлажнения мочажин. На болоте Неназванное мочажинны менее обводненные пушицево-сфагновые (*Eriophorum vaginatum*–*Sphagnum balticum*), на Мустусуо представлены также и более обводненные шейхцериево-сфагновые (*Scheuchzeria palustris*–*Sphagnum majus*) мочажинны. Гряды в обоих случаях кустарничково-сфагновые (*Sphagnum fuscum*). Оба типа комплексов характерны для верховых болот среднетаежной Карелии.

СКС приурочены к окрайкам болот Неназванное и Мустусуо. Они имеют сосновые древостои высотой до 4, реже до 7 метров с сомкнутостью до 0,3. Напочвенный покров дифференцирован слабо, на более сухих приствольных повышениях выше роль *Sphagnum fuscum* и кустарничков, в понижениях – *S. angustifolium* и пушицы.

Краткая характеристика погодных условий. Среднегодовое количество атмосферных осадков 565 мм, среднегодовая температура воздуха +2,7 °С. Период вегетации 2023 года, во время которого проводилось исследование, характеризовался умеренной температурой воздуха и обилием атмосферных осадков. Согласно данным ближайшей к месту исследования метеостанции Петрозаводск (расстояние до исследуемых болот – 35 км), за временной интервал с 1 мая по 31 октября, примерно соответствующий периоду вегетации, средняя температура воздуха составила 12,1°С, общее количество осадков – 496 мм, число дней с осадками – 118.

Методика исследования. Исследования велись в соответствии с [Metodicheskie..., 2023]. В каждом типе БГЦ заложено по 3 ПП размером 50 × 50 м, в сумме 9 ПП.

Изучение фитомассы древесного яруса. При плотности <500 деревьев/га проведен полный учет всех побегов древесных растений на ПП, при большей – на учетных площадках 10 × 10 м в 2-4 углах ПП. Отмечены порода, жизненное состояние, высота (Н) и диаметр ствола (g). Для расчета объема стволов (V) деревьев ниже 260 см использована простая формула срединного сечения Губера $V = g/2 * H$. Для более высоких деревьев проведена корректировка с использованием видового числа f: $V = f * g/2 * H$; $f = 1/2 * (1 - 1,3/H)$ [Baginskiy, 2018]. Значения объемного веса абсолютно сухой древесины сосны принято за 0,47 г/см³. Для расчета нестволовой фитомассы использовано соотношение из таблиц [Kazimirov, 1995] по Va бонитету. На 4 ПП с более развитым древостоем проведен отбор фитомассы сосны. Модельные деревья определялись как средние по размерам в каждой угловой площадке 10 × 10 м на ПП. С каждого дерева отбиралась одна средняя ветвь, которая разделялась на хвою/ветки текущего года, 2 предыдущих лет и остальные. Для фракций определен абсолютно сухой вес и содержание углерода (С). ГП определена на основе общей расчетной фитомассы хвои и веток и пропорций, полученных на модельных деревьях.

Изучение надземной фитомассы и ГП ТКЯ. Надземная фитомасса отобрана методом укусов с ТО. Число ТО на ПП варьировало от 8 до 12, в зависимости от степени однородности растительного покрова. На грядах и кочках закладывалось по 5 ТО, на пониженных элементах – 3-7. В сумме получены укусы с 84 ТО. В ходе камеральной обработки срезанные растения сортировались по видам или группам видов. Кустарнички разделялись на прирост текущего года, листья и стебли. Проведена сушка при 60 °С, взвешивание, объединение образцов по фракциям для каждой ПП, определение содержания С. ГП надземной части трав принята за 100% их фитомассы. ГП кустарничков отделялась в процессе разборки образцов фитомассы.

Определение ГП сфагновых мхов проведено на основе данных о линейном приросте и плотности ковра 23 ценопопуляций доминирующих на ПП сфагнов. Прирост оценен методами перевязок, геотропических изгибов и ёршиков [Mironov et al., 2023]. Для кочек и гряд использовались одновременно все три метода, в мочажинах – методы перевязок и геотропических изгибов. Для оценки продуктивности приростов побегов после измерений проведено определение абсолютно сухого веса и содержания С. Оценка плотности сфагнового покрова проводилась рядом с местами измерения прироста на площадках 10 × 10 см в трехкратной повторности. Для оценки ГП сфагнового покрова средняя масса прироста одного побега умножалась на плотность сфагновой дернины.

Изучение подземной фитомассы. На тех же ТО, где и надземная, была отборана подземная фитомасса. Отбор проведен методом монолитов 10 × 10 см на глубину до 40 см слоями по 10 см, всего получено от 32 до 48 образцов на каждой ПП, общее число составляет 336 образцов. При отборе монолитов замерялась толщина живой (фотосинтезирующей) части сфагновых мхов, что в дальнейшем позволило по пропорции рассчитать ее массу. В камеральных условиях проведен разбор монолитов на фракции: живые/мертвые подземные части сосудистых растений (корни, корневища, узлы кушения и т.д.), очес (остатки мхов), опад и мортмасса. Анализ проведен аналогично указанному для надземной фитомассы. ГП подземной фитомассы не оценивалась.

Таксация элементов микрорельефа проведена по всему 200 м периметру каждой ПП, на ее основе получено соотношение элементов и соответствующих им растительных сообществ, проведено итоговое взвешивание данных.

Определение С в образцах проведено на анализаторе CN802 VELP Scientifica в ЦКП КарНЦ РАН. Всего 287 образцов: 136 фракций подземной фитомассы, 79 надземной фитомассы, 48 приростов сфагновых мхов, 24 сосны, часть из них в двойной повторности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Аапа участки облесены крайне слабо, в наименьшей степени среди исследованных БГЦ, в связи с сильным обводнением и слабым развитием гряд. Суммарный пул углерода в древостое в среднем составляет 0,01 тС/га или 0,04% от всего пула живой фитомассы БГЦ (табл.). Запас углерода в наземной фитомассе аапа комплексов также минимален – 2,56 тС/га, в особенности в мочажинах – 1,92 тС/га, тогда как на грядах он сопоставим с повышенными элементами других БГЦ (3,44 тС/га). В основном он обеспечивается сфагновыми мхами (6,4%), тогда как в травах и кустарничках суммарно содержится заметно меньше углерода (2,7%).

В живой подземной фитомассе 40 см слоя залежи гряд депонировано 11,07 тС/га, мочажин – 29,16 тС/га, в целом, 21,56 тС/га (89,4% от всей фитомассы БГЦ). Столь высокий запас углерода в живых подземных органах растений является особенностью аапа участков и связано с хорошей проточностью. Возможно также некоторое завышение, связанное со сложностью разделения живых и отмерших плотно переплетенных корней. В мортмассе 40 см слоя залежи содержится 38,71 тС/га, большая часть в остатках мхов. Еще одно отличие аапа – большой объем сильно разложенной неопределяемой при разборе мортмассы.

ГП наземного покрова аапа минимальна: 1,66 тС/га что связано с развитием обширных топей с разреженным растительным покровом. В сравнении с другими БГЦ здесь выше роль сосудистых растений (0,63 тС/га) за счет преобладания травянистых растений в ТКЯ.

ГМК. Облесенность участков значительно варьирует, что отражается на общем пуле углерода в фитомассе сосны. На наиболее облесенной из ПП надземная живая фитомасса древостоя содержит 0,31 тС/га, на двух других, более обводненных ГМК, запас менее 0,02 тС/га. В сухостое, соответственно 0,19 тС/га и менее 0,01. Среднее содержание углерода в живом древостое составляет 0,11 тС/га (0,8% от всего пула в живой фитомассе). В ГМК пул углерода в наземном покрове максимален среди исследованных БГЦ (4,2 тС/га), основную долю в нем имеют сфагновые мхи (3,5 тС/га, или 27,1%), в травах и кустарничках 0,7 тС/га или 5,6%. При этом в мочажинах за счет большей живой фитомассы сфагнов общий запас в 1,5 раза выше, чем на грядах.

В подземной фитомассе содержится в среднем 8,6 тС/га (66,4%), при этом в грядах содержание значительно выше (11,4 тС/га), чем в мочажинах (3,9-7,1 тС/га) за счет корней и погруженных в сфагновый покров стеблей кустарничков. В мортмассе 40 см слоя залежи содержится, в среднем, 61,8 тС/га, большая часть в остатках мхов. В пушицево-сфагновых мочажинах запас достигает 80,1 тС/га за счет плотных дернин пушицы.

ГП наземной фитомассы составляет 0,48 тС/га сосудистыми растениями (минимальное значение среди БГЦ) и 1,56 тС/га – мхами.

СКС имеют наиболее развитые древостои среди исследованных БГЦ. Средние высоты деревьев составляют здесь 1-2 м, отдельные деревья достигают высоты 5-6 м, большая часть последних представлены сухостоем. Пул углерода в живом древостое СКС участков составляет 2,92 тС/га, в сухостое – 1,66 тС/га. Соответственно, вклад древостоя в общий пул углерода живой фитомассы БГЦ здесь также максимальный – 18,2%. В наземном покрове СКС депонировано 4,5 тС/га, причем помимо мхов (2,9 тС/га, 18,1%), заметная доля содержится в кустарничках (1,11 тС/га, 6,9%).

В подземной фитомассе содержится в среднем 9,04 тС/га (56,5%). В мортмассе 40 см слоя залежи – 64,3 тС/га, причем доля отмерших частей сосудистых растений здесь минимальна, а сфагновых мхов, соответственно, максимальна.

Суммарный вклад хвои и новых веток в ГП составляет 0,04 тС/га за год. Надземная фитомасса здесь также демонстрирует максимальную ГП – 2,21 тС/га за год, в основном, за счет сфагновых мхов (1,64 тС/га).

Таблица. Запас и ГП углерода по элементам и типам БГЦ.

БГЦ Элемент микрорельефа	Аапа			ГМК				СКС		
	Гряды	Моч	Σ	Гряды	П Моч	Ш Моч	Σ	Пов	Пон	Σ
Запас, тС/га										
Древостой, сумма			0,01				0,22			5,56
в т.ч. надземная живая часть			0,01				0,11			2,92
сухостой			<				0,07			1,66
подземная живая часть (расчёт)			<				0,02			0,61
подземная мертвая часть (расчёт)			<				0,01			0,37
Надземный покров, сумма	3,44 ±0,76	1,92 ±1,09	2,56	3,86 ±1,1	5,38 ±2,43	5,54 ±1,33	4,57	3,62 ±1,06	6,42 ±1,28	4,46
мхи	2,39 ±0,8	0,91 ±1,13	1,53	2,43 ±0,92	4,66 ±2,75	5,18 ±1,42	3,52	1,84 ±0,34	5,4 ±1,6	2,90
кустарнички	0,43 ±0,34	0,02 ±0,04	0,19	1,05 ±0,49	0,15 ±0,14	0,08 ±0,1	0,64	1,31 ±0,74	0,64 ±0,46	1,11
травы	0,32 ±0,19	0,58 ±0,23	0,47	0,04 ±0,09	0,19 ±0,13	0,16 ±0,03	0,10	0,02 ±0,06	0,1 ±0,06	0,04
ветошь+опад	0,25 ±0,18	0,41 ±0,38	0,34	0,35 ±0,15	0,38 ±0,37	0,12 ±0,08	0,32	0,45 ±0,2	0,29 ±0,11	0,40
Подземная фитомасса (живые части сосудистых растений), 0–40 см, сумма	11,07 ±5,33	29,16 ±14,18	21,56	11,4 ±4,36	3,88 ±2,98	7,06 ±3,75	8,62	8,75 ±3,05	9,73 ±6,67	9,04
Подземная мортмасса, 0–40 см, сумма	34,53 ±12,37	41,26 ±20,12	38,71	54,97 ±27,24	80,09 ±26,39	55,95 ±8,7	61,77	56,55 ±10,48	79,48 ±11,31	63,43
очес (остатки мхов)	31,52 ±12,66	10,85 ±12,09	19,53	49,23 ±26,37	45,74 ±22,61	45,08 ±6,36	47,55	51,64 ±9,92	65,65 ±14,29	55,85
мертвые части сосудистых растений	2,51 ±1,83	6,2 ±5,28	4,65	4,54 ±5,6	33,9 ±31,61	10,33 ±5,29	13,33	4,05 ±2,53	12,69 ±6,01	6,64
опад	0,49 ±0,29	0,3 ±0,69	0,38	1,2 ±0,85	0,46 ±0,5	0,54 ±0,24	0,88	0,86 ±0,58	1,13 ±0,62	0,94
неопределяемая мортмасса	0,7 ±2,82	23,91 ±15,93	14,16	-	-	-	-	-	-	-
Годичная продукция*, тС/га										
Ветки и хвоя сосны			<				<			0,04
Мхи	1,93 ±0,81	0,37 ±0,88	1,03	1,81 ±0,38	1,22 ±0,32	1,25 ±0,2	1,56	1,6 ±0,11	1,76 ±0,43	1,64
Кустарнички	0,36 ±0,51	0,01 ±0,03	0,16	0,63 ±0,22	0,11 ±0,1	0,05 ±0,06	0,39	0,57 ±0,27	0,41 ±0,25	0,52
Травы	0,32 ±0,19	0,58 ±0,23	0,47	0,04 ±0,09	0,19 ±0,13	0,16 ±0,03	0,10	0,02 ±0,06	0,1 ±0,06	0,04

Обозначения: Моч – мочажины (П – пушицевые, Ш – шейхцериевые), Пов – повышения, Пон – понижения, Σ - пространственно-взвешенное среднее. * определялась только надземная чистая первичная продукция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследованные БГЦ значительно различаются как по общему пулу углерода в живой фитомассе, так и по доле в нем различных фракций. Наибольший общий пул в живой фитомассе выявлен на аапа болотах, наименьший – в ГМК, что может объясняться ухудшением условий водно-минерального питания участков. Во всех случаях основной пул углерода живой фитомассы выявлен в подземных частях сосудистых растений. Особенностью аапа участков является

несущественная доля древостоя, низкая мхов и максимально высокая подземных органов сосудистых растений в общем пуле углерода живой фитомассы. Для ГМК характерна повышенная доля сфагновых мхов и пониженная сосудистых растений в пуле углерода. СКС отличаются более развитым древостоем, пулы углерода в нем и в моховом покрове примерно равны. Другими особенностями СКС являются относительно высокая доля кустарничков и относительно низкая – подземных органов растений. В мортмассе во всех случаях основной составляющей являются остатки сфагновых мхов. В мочажинах ГМК активное развитие пушицы приводит к формированию плотных дернин, сохраняющихся в торфе, однако и здесь остатки сфагнов составляют основную мортмассу. Это свидетельствует о том, что во всех исследованных БГЦ основная роль в длительном депонировании углерода связана со сфагновыми мхами. Это же подтверждается значениями ГП, наибольшую долю в которой во всех случаях составляют сфагновые мхи.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6)». Анализ образцов выполнен с использованием оборудования ЦКП КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baginsky V.F. 2018. *Forest taxation: a textbook for students of the specialty "Forestry", "Forest Engineering"*, GSU im. F. Skorina, Gomel, 367 pp. (in Russian) [Багинский В.Ф. 2018. Лесная таксация: учебник для студентов специальности «Лесное хозяйство», «Лесоинженерное дело». Гомель: ГГУ им. Ф.Скорины. 367 с.]
- Elina G.A. 1977. Mire types of the Shuya Plain. In: *Stationary study of mires and paludified forests in connection with melioration*, (N.I. Pyavchenko, ed.), pp. 5–19, Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences, Petrozavodsk (in Russian). [Елина Г.А. 1977. Типы болот Шуйской равнины // Стационарное изучение болот и заболоченных лесов в связи с мелиорацией / Под ред. Н.И. Пьявченко. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР. С. 5-19]
- Elina G.A., Kuznetsov O.L., Maksimov A.I. 1984. *Structural and functional organisation and dynamics of mire ecosystems in Karelia*. Nauka, Leningrad, 128 pp. (in Russian) [Елина Г.А., Кузнецов О.Л., Максимов А.И. 1984. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л: Наука, 128 с.]
- Elina G.A., Lukashov A.D., Tokarev P.N. 2005. *Mapping of vegetation and landscapes on temporary cuts of the Holocene of a taiga zone of East Fennoscandia*. Nauka, St. Petersburg, 112 pp. (in Russian) [Елина Г.А., Лукашов А.Д., Токарев П.Н. 2005. Картографирование растительности и ландшафтов на временных срезах голоцена таежной зоны восточной Фенноскандии. СПб: Наука. 112 с.]
- Pyasov D.V., Meshcheryakova A.V., Glagolev M.V., Kupriianova I.V., Kaverin A.A., Sabrekov A.F., Kulyabin M.F., Lapshina E.D. 2023. Field-Layer Vegetation and Water Table Level as a Proxy of CO₂ Exchange in the West Siberian Boreal Bog. *Land*, 12 (3): 566. <https://doi.org/10.3390/land12030566>
- Joosten H., Clarke D. 2002. Wise use of mires and peatlands. *International mire conservation group and international peat society*. Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi, 304 pp.
- Kazimirov N.I. 1995. *Pine forests ecological productivity (Mathematical model)*, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, 132 pp. (in Russian). [Казимиров Н.И. 1995. Экологическая продуктивность сосновых лесов: Математическая модель. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 132 с.]
- Methodological recommendations for assessing carbon pools and flows in mire ecosystems in Russia. Part 1. Field studies*. 2023. Khanty-Mansiysk. 62 pp. (in Russian) [Методические рекомендации по оценке углеродных пулов и потоков в болотных экосистемах России. Часть 1. Полевые исследования. 2023. Ханты-Мансийск. 62 с.]
- Mironov V.L., Kuznetsov O.L., Kantserova L.V., Kutenkov S.A., Ignashov P.A., Talbonen E.L., Vasyuta V.S., Svirida A.N. 2023. Comparison of linear increments and annual production of Sphagnum mosses obtained using three research methods (Koivulambisuo mire system, southern Karelia). *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*, 8: 48–64. (in Russian) [Миронов В.Л., Кузнецов О.Л., Канцеров Л.В., Кутенков С.А., Игнашов П.А., Талбонен Е.Л., Васюта В.С., Свирида А.Н. 2023. Сравнение линейных приростов и годичной продукции сфагновых мхов, полученных с применением трех методов исследований (болотная система Койвуламбисуо, южная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Экологические исследования. №8. С. 48-64] <https://doi.org/10.17076/eco1847>
- Yurkovskaya T.K. 1992. Geography and Cartography of Mire Vegetation of European Russia and Neighbouring Territories. *Transactions of Komarov Botanical Institute*, 4: 1-256 (in Russian) [Юрковская Т.К. 1992. География и картография растительности болот Европейской России и сопредельных территорий. СПб.: БИН РАН. 256 с.]

Поступила в редакцию: 14.07.2024
Переработанный вариант: 16.08.2024

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL OBSERVATIONS, MODELING AND INFORMATION SYSTEMS: ENVIROMIS-2024

Golovatskaya E.A.¹, Gordov E.P.¹

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

golovatskayaea@gmail.com

Citation: Golovatskaya E.A., Gordov E.P. 2024. International conference on environmental observations, modeling and information systems: Enviromis-2024. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 15(1): 74-77.

DOI: 10.18822/edgcc631693

Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2024 состоится в Томске 1-6 июля 2024 г (рис.1). Конференция является тринадцатой в серии конференций и проводится в рамках мероприятий, посвященных 300-летию Российской академии наук и 270-летию Московского университета. Организаторами конференции являются Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Гидрометцентр России, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.



Рисунок 1. Анонс международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2024

Первая конференция организована в 2000 году Институтом оптики атмосферы СО РАН и Томским научным центром при финансовой поддержке INTAS Conference Monitoring Grant (00-MO-0134), FW5 INCO COPERNICUS 2 Accompanying Measure Support Grant (ICA-CT-2000-60001) и ряда государственных организаций: Президиум СО РАН, Научный совет по математике и информатике СО РАН, Администрация Томской области, Государственный комитет экологии Томской области, Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Институт оптики атмосферы, Томский научный центр и Институт оптического мониторинга СО РАН.

Конференция была посвящена современному состоянию и использованию современных методов наблюдений за окружающей средой, моделей и информационных технологий для оценки уровня загрязнения воздуха, воды, почвы и растительности в интегрированных информационных

системах, предназначенных для управления состоянием окружающей среды в промышленных зонах, а также на городском и региональном уровнях. Одна из основных задач конференции – уменьшение разрыва между достижениями фундаментальной науки и их практическим применением в данных областях, а также создание надежной основы для уменьшения уровня загрязнений окружающей среды. Конференция затронула особо важные для стран СНГ проблемы, которые также не решены окончательно и в Европе.

Начиная с 2002 года междисциплинарные конференции ENVIROMIS, проводятся на базе Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Особое внимание уделяется детальному обсуждению результатов исследований заметных природно-климатических изменений, наблюдаемых в последнее время в некоторых районах Северной Евразии (в так называемых климатических «горячих пятнах»). Наблюдения и модели указывают на рост температуры в этих местах, значительно опережающий рост средней температуры Земли. Более того, именно эти районы могут дать значительный вклад в изменение глобальных климатических характеристик. «Горячие пятна» привлекли внимание ряда исследовательских организаций и фондов, особенно, Сибирского Отделения РАН, NASA, IGBP и 6 рамочной программы Европейского союза. В частности, этой теме была посвящена трехдневную рабочую группу «Организация комплексного мультидисциплинарного исследования “горячих пятен” в Евразии», включенную в программу конференции.

С 2004 года в рамках конференции проводятся школы молодых ученых для решения проблемы разрыва поколений в науках об окружающей среде. Для смягчения последствий этого разрыва и для повышения профессионального уровня молодых ученых на конференции представляются приглашенные лекции специалистов из СНГ и Европы, которые помогают молодым ученым получить свежую информацию по важнейшим направлениям наук об окружающей среде. Осуществлялась поддержка участия в конференции ряда молодых ученых и специалистов из СНГ для обмена опытом и идеями, а также поиска новых возможностей и путей исследования различных проблем наук об окружающей среде.

Особое внимание на конференции уделяется детальному обсуждению состояния и динамики окружающей среды Сибири под влиянием глобального изменения климата. Будучи регионом с наиболее выраженными изменениями климата и большим потенциальным влиянием на функционирование системы Земля в целом, в недавнем времени Сибирь привлекла внимание ряда исследовательских и финансирующих организаций, таких как СО РАН, Шестая рамочная программа ЕС, ИНТАС, МНТЦ, НАСА, МГБП и партнерство наук о системе Земля в целом. Этой теме был посвящен специальный семинар «Развертывание интегрированного регионального исследования Сибири». Особое внимание было уделено оценке влияния изменений климата и адаптации к этим изменениям, в частности, для разработки эффективных и экономически-выгодных стратегий адаптации.

В 2006 году в конференцию включен специальный симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды». Его секции были посвящены новым методам и приборам контроля окружающей среды; технологиям мониторинга окружающей среды и климата; технологиям охраны и реабилитации окружающей среды и влиянию изменений климата и экосистемы на здоровье населения. Кроме того, была организована специальная секция «Мониторинг, управление и снижение антропогенных изменений в Сибири», целиком посвященная проекту Шестой рамочной программы Enviro-RISKS: Monitoring, Management and Remediation of Man-made Changes in Siberia. В рамках работы конференции 2008 года было организовано открытое заседание Российского национального комитета МГБП, который возглавлял проект «Развитие интегрированного исследования Сибири».

Шестая конференция была организована совместно с Иркутским научным центром и Институтом динамики систем и теории управления СО РАН. Основной научный вопрос этой конференции был обозначен следующим образом: как нам развить возможности прогнозирования динамики наземных экосистем в Северной Евразии в 21 веке для поддержки глобальных прогнозов, а также для повышения уровня информированности ответственных лиц и научного обеспечения многочисленных практических применений в регионе? Конференция была проведена в сотрудничестве с интегрированным региональным исследованием муссонов в Азии (MAIRS). Отличие данного проекта от других проектов по изучению муссонов (например MAHASRI) заключалось в том, что MAIRS не рассматривает сам по себе муссонный климат, а фокусируется на взаимодействии системы «население–муссоны». Он пытается понять, в какой степени деятельность человека влияет на муссонный климат Азии, и как изменения муссонного климата повлияют на дальнейшее социально-экономическое развитие Азии. Тематика 9 конференции расширяется

результатами полученными в рамках проекта по развитию сети инструментальных наблюдений в Северной Евразии Pan Eurasian Environmental Experiment (PEEX, <http://www.atm.helsinki.fi/peex/>), а также проекта Сибирско-Французского центра образования и науки (SFC-ER) который направлен на выяснение роли экосистем Сибири в глобальных изменениях. 2020 год внес существенные изменения в регламент проведения конференций, из-за ограничений на проведение мероприятий в связи с коронавирусом, тем не менее, отменять и переносить конференцию не стали, конференция состоялась и была успешно проведена в режиме он-лайн, последующие конференции проводились в смешанном формате, что позволило привлечь большее количество участников.

Проводимые с 2000 года конференции, являются площадкой для встречи исследователей, работающих в разных областях наук об окружающей среде. Они позволяют развивать междисциплинарное сотрудничество в этой области, комплексные исследования системы Земля на глобальном и региональном уровнях, привлекать представителей национальных и международных научных организаций, а также промышленности и других заинтересованных сторон.

Представление и обсуждение научных результатов по приоритетным направлениям в области наук о Земле позволяет детально рассмотреть происходящие тенденции взаимодействия и динамики природных систем Северной Евразии, в частности, Сибирского региона и Арктики, в которых климатические изменения наиболее выражены, выявить климатообразующие процессы и факторы, обсудить уровень развития современных климатических моделей и моделей прогноза, их верификацию и практическое применение, а также определить оптимальные направления дальнейших исследований и возможности междисциплинарного сотрудничества.

В 2024 году программа конференции состоит из 13 тематических секций, посвященным различным аспектам измерения, моделирования и информационным системам для изучения окружающей среды.

В секции «Мониторинг климатических изменений в Северной Евразии» будут рассмотрены современные методы наблюдений за изменениями окружающей среды Северной Евразии под воздействием естественных и антропогенных факторов, включая глобальные изменения климата.

В рамках секции «Климатическое и метеорологическое моделирование» будут представлены доклады о применении современных моделей и численных методов для повышения точности прогнозирования погоды на различных временных масштабах, а также рассмотрены вопросы, связанные с анализом результатов моделирования погоды и климата, в частности, региональных атмосферных процессов и региональных проявлений глобальных климатических изменений.

На секции «Развитие национальной климатической модели» планируются доклады участников консорциума по созданию новой версии модели Земной системы, в частности вопросы моделирования динамики различных компонент климатической системы и интеграции их моделей.

На секции «Структура и динамика геофизических пограничных слоёв» будут обсуждаться процессы в пограничных слоях атмосферы и океана. Особое внимание будет уделено турбулентному переносу и взаимодействию атмосферы с океаном и деятельным слоем суши. Вопросы динамики устойчивых и конвективных пограничных слоев, взаимодействия Атмосферного пограничного слоя с верхней атмосферой также будут рассматриваться в рамках этой секции, кроме того в тематику секции включено обсуждение результатов моделирования турбулентных процессов и разработки турбулентных замыканий и параметризаций для моделей Земной системы.

Важным направлением является работа секции «Состав атмосферы, перенос загрязнений и изменения климата», в ходе которой будут обсуждаться математические модели и результаты экспериментальных исследований процессов переноса и трансформации в атмосфере различных химических веществ в газовой фазе и в виде аэрозолей. Будут рассмотрены интегрированные модели динамики и химии атмосферы, а также задачи совместного использования моделей и данных измерений, включая обратные задачи и задачи усвоения данных. Кроме того, планируется обсудить вопросы влияния изменяющегося климата на процессы переноса и трансформации примесей и задачи оценки рисков от воздействия источников примесей на прилегающие к ним территории.

Секция «Отклик наземных экосистем Северной Евразии на климатические изменения» будет посвящена исследованиям отклика экосистем бореальной, лесостепной зон и тундры на происходящие климатические изменения. А также исследованиям, связанным с проблемами влияния на качественные, количественные, функциональные и пространственные изменения в лесных, болотных и горных экосистемах и их компонентах, в результате учащения экстремальных погодных условий, аридизации, изменения температурного режима, таяния ледников и вулканогенного возмущения стратосферы. Также планируется обсуждение результатов исследований долговременных изменений, происходивших и в доинструментальный период наблюдений.

В рамках секции «Углерод в наземных экосистемах Северной Евразии» будут представлены доклады по изучению запасов и потоков углерода в наземных экосистемах Северной Евразии, в том числе, в рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения «Национальная система мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации».

На секции «Процессы на поверхности суши: наблюдения, модели и усвоение данных» будут обсуждаться вопросы, посвящённые наблюдениям и математическому моделированию термодинамических, гидрологических, биогеохимических и экосистемных процессов в деятельном слое суши, включая почвы, растительность, городские ландшафты, водные объекты суши.

Оценка региональных рисков при изменениях климата, в том числе исследования изменчивости экстремальных осадков, засух и наводнений, их частоты и локализации будет проводиться в рамках работы секции «Экстремальные климатические явления, региональные риски и социо-экономические последствия». А также будут рассмотрены проблемы, связанные с повышением заблаговременности и качества прогноза погодных явлений, будут обсуждаться последние достижения в области численного прогноза погоды, а также оценки социо-экономических рисков в регионах, подверженных этим явлениям.

Одна из секций – «Инструментальная и информационно-измерительная инфраструктура региональных исследований окружающей среды» посвящена новым разработанным приборам и созданным на их основе информационно-измерительным системам, которые позволяют проводить мониторинг состояния окружающей среды на больших площадях в реальном времени и посредством телекоммуникационных сетей передавать данные в единый центр для обработки и архивирования данных наблюдений.

Важным направлением конференции является секция «Информационно-вычислительная инфраструктура региональных исследований окружающей среды» в рамках которой будет проводиться обсуждение вопросов доступности данных и их форматов, используемых в науках о Земле, способов обмена данными, а также разработанных информационно-вычислительных систем для обработки архивов данных. Будут представлены прикладные информационно-вычислительные системы для решения конкретных задач мониторинга и моделирования изменений окружающей среды.

Работа секции «Машинное обучение в задачах наук о Земле» будет посвящена решению задач, характерных для наук о Земле, с применением подходов и методов машинного обучения и глубокого обучения. Секция сфокусирована на темах моделирования и измерения характеристик процессов в океане и ледовом покрове, атмосфере, водах суши, почве, а также взаимодействия между ними.

Традиционно одна из секций конференции посвящается исследованиям в рамках международной программы Northern Eurasia Future Initiative (NEFI), где особое внимание будет уделено детальному обсуждению состояния и динамики окружающей среды Северной Евразии, в особенности Сибири и Арктики. Результаты этой программы неоднократно представлялись на предыдущих конференциях ENVIROMIS.

Дополнительная информация о предстоящей Конференции и программных мероприятиях размещена на сайтах – <https://enviromis.ru/2024> и <http://www.scert.ru/en/conferences/>. Следует добавить, что на втором сайте доступна информация о всей серии проведенных конференций ENVIROMIS и открыт доступ к представленным на них материалам. В настоящее время завершается формирование программы конференции этого года. На нее заявлено 243 доклада от сотрудников 63 организаций. Так как две секции конференции непосредственно отражают работу двух консорциумов исполнителей важнейшего инновационного проекта государственного значения «Национальная система мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации», да и тематика остальных секций значима для этого проекта, то конференция станет хорошей площадкой как для обсуждения полученных в ходе его выполнения результатов и планов развития тематических исследований, так и для ознакомления научной общественности с ходом его выполнения.

Согласно условиям, сформулированным Оргкомитетом, предусматривается возможность свободного удаленного участия в работе конференции (без доклада). Ссылки на адреса для подключения будут доступны на указанных выше сайтах. Приглашаем всех желающих воспользоваться этой возможностью.

Научное издание

ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Том 15, выпуск 1/2024

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 16.08.2024

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

