

**Западно-Сибирские
торфяники
и цикл углерода:
прошлое и настоящее**

**West Siberian Peatlands
and Carbon Cycle:
Past and Present**

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск
Природный парк «Нумто», г. Белоярский
Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), г. Томск
Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения
Российской академии наук (ИПА СО РАН), г. Новосибирск
Национальный исследовательский «Томский государственный университет», г. Томск
Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН), г. Москва
Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси, Республика Беларусь
Институт географии и агроэкологии КНР, Китайская народная республика

ЗАПАДНО-СИБИРСКИЕ ТОРФЯНИКИ ЦИКЛ УГЛЕРОДА: ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ

МАТЕРИАЛЫ

**Седьмого международного полевого симпозиума,
Ханты-Мансийск, Белоярский 15-27 августа 2024 г.**

Томск
2024

Yugra State University, Khanty-Mansiysk
Numto Nature Park, Beloyarsky, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra
Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk
Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk
National Research Tomsk State University, Tomsk
Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow
Institute of Experimental Botany Named after V.F. Kuprevich
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk
Northeast Institute of Geography and Agroecology Chinese Academy of Sciences

WEST SIBERIAN PEATLANDS AND THE CARBON CYCLE: PAST AND PRESENT

PROCEEDINGS
of the Seventh International Field Symposium
Khanty-Mansiysk, Beloyarsky, 15 – 27 August 2024

Tomsk
2024

УДК 556.6

330 Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее/ Материалы Седьмого международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, Белоярский 15 – 27 августа 2024 г.). – Томск : Изд-во Томского государственного университета, 2024 – 286 с.

ISBN

Сборник материалов Седьмого международного полевого симпозиума «Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее» охватывает разнообразные проблемы в области болотоведения и смежных с ним дисциплин. Рассматриваются вопросы биоразнообразия флоры и фауны болот, обсуждаются проблемы генезиса, палеоэкологии и эволюции болот. Для широкого круга специалистов, работающих в области болотоведения, биогеохимии, экологии, почвоведения, охраны природы, рационального использования ресурсов, а также студентов и преподавателей вузов.

Организационная и финансовая поддержка:

1. Правительство Ханты-Мансийского автономного округа-Югры;
2. Администрация Белоярского района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры;
3. Служба по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа – Югры;
4. Департамент недропользования и природных ресурсов Ханты-Мансийского автономного округа – Югры;
5. Департамент молодежной политики, гражданских инициатив и внешних связей Ханты-Мансийского автономного округа – Югры;
6. Природный парк «Нумто»;
7. Сибирская Сеть по изучению изменений окружающей среды SecNet.

UDK 556.6

West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: past and present: Proceedings of the Fifth International Field Symposium (Khanty-Mansiysk, Beloyarsky August 15 – 27, 2024). – Tomsk : Publishing house of Tomsk State University, 2024. – 286 p.

ISBN

The book contains proceedings of the Fifth International Field Symposium «West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present». Published abstracts and papers cover diverse areas of mire study and allied disciplines. The issues of biodiversity of mire flora and fauna, problems of the mire genesis, evolution and paleoecology are considered. Proceedings of the symposium are of interest for researchers of mire study, biogeochemistry, ecology, soil science, environmental protection, nature conservation.

Supported by:

1. Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra
2. Administration of Beloyarsk District, Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra;
3. Service for Control and Supervision in the Field of Environmental Protection, Wildlife Objects and Forest Relations, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra;
4. Department of Natural Resources, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra;
5. Department of Youth Policy, Civil Initiatives, Public and External Relations, Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra;
6. Numto Nature Park, Beloyarsky, Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra;
7. Siberian Environmental Change Network SecNet.

© Авторы, текст, 2024

© ФГБОУВО «Югорский государственный университет», 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем издании представлены материалы научных исследований участников VII Международного полевого симпозиума «Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее» – West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: past and present (WSPCC-2024).

Первый симпозиум был проведен в 2001 году в городе Ноябрьске (Ямало-Ненецкий автономный округ) в рамках рабочего совещания международного проекта ИНТАС (INTAS-99-01718) «Климат в связи с накоплением углерода: пространственно-временной анализ торфяных экосистем Западной Сибири». Научное значение всех последующих полевых симпозиумов (2007, 2011, 2014, 2017, 2021) далеко вышло за рамки собственно Западной Сибири. Тематика WSPCC симпозиумов охватывает широкий круг вопросов, связанных с изучением биоразнообразия, экологии и особенностей функционирования болотных экосистем в разных регионах России и мира, их углеродного баланса и роли в глобальном круговороте углерода. В настоящее время эта тематика вышла на первый план научной повестки во многих странах мира, начала привлекать внимание общественности, органов государственной власти и бизнеса.

VII Международный полевой Симпозиум – масштабное событие для российской и мировой научной общественности, занимающейся изучением роли торфяных болот в углеродном цикле планеты, который непосредственно связан с изменением климата. Его тематика охватывает все актуальные направления современного болотоведения, экологии и биоразнообразия болот, исследования биохимических циклов и моделирование баланса углерода, гидрологии и гидрохимии, продуктивности и разложения, биогеохимии и динамики отложения торфа, палеоэкологии и истории развития болотных экосистем. Кроме того, сегодня в актуальную научную повестку входят вопросы адаптации к климатическим изменениям, снижения воздействия на климат, формирования национальной системы углеродного регулирования.

Традиционно в материалах симпозиумов WSPCC большое внимание уделяется вопросам изучения различных составляющих углеродного цикла естественных и антропогенно нарушенных болот от оценки запасов и динамики накопления углерода болотными фитоценозами, объемов поглощения и эмиссии углеродсодержащих газов, полученных разными методами, до моделирования углеродного баланса и прогноза влияния болотных экосистем на климат. В свою очередь изменения климата обуславливают существенные изменения в режиме функционирования болот. Эта взаимообусловленность предопределяет актуальность всестороннего анализа функционирования болотных экосистем при возможных ожидаемых или уже происходящих изменениях климата на планете.

В сборнике представлены также результаты изучения гидрологического режима болот и химического состава болотных вод. Рассматриваются вопросы типологии растительности и биологического разнообразия болот на видовом уровне (высшие сосудистые растения, мохообразные, грибы, беспозвоночные гидробионты) в разных регионах России. В ряде статей затронуты вопросы картографирования болот с применением новых информационных технологий и данных дистанционного зондирования Земли. Целая группа докладов посвящена палеоэкологическим аспектам и истории развития болот в голоцене.

Материалы сборника отражают высокий научный уровень и содержат большое количество фактических данных, полезных для исследователей различных направлений.

Оргкомитет выражает благодарность всем, откликнувшимся на инициативу по проведению очередного симпозиума, материалы которого представлены в данном издании. Этот симпозиум станет важным этапом обсуждения достижений и проблем исследования болотных экосистем для решения актуальных задач в современных условиях изменения климата и экономического развития.

Оргкомитет Симпозиума

Plenary reports

Пленарные доклады

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛОТ БЕЛАРУСИ И ПЛАН ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ НА ПЕРИОД ДО 2040 ГОДА

ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE OF THE MIRE OF BELARUS AND THE PLAN FOR THEIR ECOLOGICAL RESTORATION FOR THE PERIOD UNTIL 2040

Д.Г. Груммо^{1}, Н.А. Зеленкевич¹, Е.В. Мойсейчик¹, А.В. Козулин², М.В. Максименков²
D.G. Grummo¹, N.A. Zeliankevich¹, E.V. Mojsejchik¹, A.V. Kozulin², M.V. Maksimenkov²*

¹ Institute of Experimental Botany of the NAS of Belarus (Minsk, Belarus)

² Scientific and Practical Center of the NAS of Belarus for bioresources (Minsk, Belarus)

E-mail: *zm.hrmo@gmail.com

Республика Беларусь является одной из наиболее важных торфяных стран региона. Согласно произведенным расчетам страна занимает 15-е место в мире – по общей площади торфяников¹, 20-е – по процентному соотношению территории торфяников ко всей остальной территории страны; 21-е – по фактическому запасу углерода.

Общая площадь торфяных болот в Беларуси до осушения составляла 2939 тыс. га (14% от территории страны). К настоящему времени в естественном или слабо нарушенном состоянии сохранилось 779,5 тыс. га болот (26,5% от первоначальной площади естественных болот), из которых 630 тыс. га находятся в границах особо охраняемых природных территорий, около 313 тыс. га болот соответствуют критериям выделения типичных и редких биотопов и нуждаются в установлении режима специальной охраны. Международный статус охраны имеют 314 тыс. га болот.

Среди естественных и слабо нарушенных болот преобладают лесные, занимающие 397,7 тыс. га (36,1%), в т.ч. сосновые – 190,6 тыс. га (17,4%), пушистоберезовые – 132,7 тыс. га (12,0%) и черноольховые леса – 74,0 тыс. га (6,7%). Площадь открытых (нелесных) болот составляет 330,3 тыс. га (29,9%), в т.ч. верховых – 102,2 тыс. га (9,3%), переходных – 53,1 тыс. га (4,8%), низинных – 175,0 тыс. га (15,8%). Среди этой площади доля зарастающих болот (редколесий) составляет 33,8% (111,8 тыс. га), стабильные открытые болота с естественной и слабо нарушенной структурой и видовым составом занимают площадь 218,5 тыс. га. В целом древесная растительность присутствует на 65,3% площади

исследованных естественных и слабо нарушенных болот (рисунок).

Сохранившиеся в естественном состоянии болота выполняют газорегуляторную функцию – ежегодно они выводят из атмосферы около 900 тыс. тонн диоксида углерода и выделяют в атмосферу 630 тыс. тонн кислорода. В болотах Республики Беларусь накоплено и сохраняется около 500 млн. тонн углерода.

Болота являются местами обитания редких и находящихся под угрозой исчезновения видов диких животных и дикорастущих растений. На болотах обитает 32% видов птиц, 30% видов насекомых, произрастает более 30% дикорастущих растений, включенных в Красную книгу Республики Беларусь. Около 40% мировой популяции вертлявой камышевки, 10% большого подорлика, 3% дупеля – видов, находящихся под угрозой глобального исчезновения, – обитают на болотах Республики Беларусь. Болота обладают значительными биологическими ресурсами клюквы, лекарственных растений, охотничьих видов диких животных. Развитие экологического туризма в Беларуси во многом связано с рекреационным потенциалом болот.

Хотя история мелиорации болот насчитывает несколько столетий, их широкомасштабное осушение было проведено в Беларуси в основном в 1960–1980-е годы.

Были реализованы программы по мелиорации болот в сельском, лесном хозяйстве, осушения болот для добычи торфа. К 1990-м годам работы по масштабной мелиорации болот были свернуты.

В сельском хозяйстве используется 1068,2 тыс. га осушенных земель с торфяными почва-

¹ Используется по аналогии с англоязычными терминами «mire» и «peatland», обозначающими, соответственно, естественное «торфяное болото», где есть условия и происходит накопление торфа, и «торфяник», атрибутом которого является только наличие торфяной залежи, и относящийся как к естественным, так и в большей степени антропогенно нарушенным объектам.

ми, из них 122,2 тыс. га было передано сельскому хозяйству после рекультивации выбывших из промышленной эксплуатации торфяных месторождений. По результатам проведенных почвенных обследований установлено, что на площади 258,8 тыс. га осушенных земель торфяные почвы утратили свои генетические признаки и перешли в категорию антропогенно-преобразованных, из них 190,2 тыс. га – в категорию деградированных торфяных почв (потеря органического вещества более 50%). По предварительным данным в сельском хозяйстве используется около 750 тыс. га осушенных земель с торфяными почвами, около 250 тыс. га использовались не эффективно и переведены в другие виды пользования.

С целью повышения продуктивности лесов в 1960–1980 гг. была проведена осушительная мелиорация 304 тыс. га лесных болот: положительный эффект получен на 43% общей площади осушенных болот. На остальной площади гидролесомелиоративных систем прирост древесины является незначительным или отсутствует.

Около 9% осушенных площадей приходится на верховые болота, на которых отсутствует ощутимый положительный эффект повышения продуктивности лесов за счет осушения. Общая площадь болот, неэффективно осушенных лесной мелиорацией, составляет 24,0 тыс. га. На них наблюдаются процессы деградации естественных болотных экосистем, создаются условия повышенной пожароопасности. Для лесохозяйственного использования юридическим лицам, ведущим лесное хозяйство, было передано 103 тыс. га выработанных площадей торфяных месторождений. За период с 2010 по 2014 годы списано 79,27 тыс. га гидролесомелиоративных систем, которые в экономическом и экологическом отношении являлись не эффективными.

Около 96 % торфяников, осушенных для сельскохозяйственного использования, составляют земли с торфяными почвами низинного типа и 4% – земли с торфяными почвами верхового и переходного типов. Более 70% общей площади осушенных земель с торфяными почвами имеют мощность торфяного слоя до 1 метра. На более 90% площади осушенных торфяников торфяные почвы подстилаются песками, на остальной площади – супесями и суглинками. Около 30% торфяников, используемых в сельском хозяйстве, относятся к пахотным землям и около 70% – к луговым землям.

К основным проблемам в области сохранения и рационального (устойчивого) использования торфяников относятся:

- нарушение гидрологического режима болот осушительной сетью каналов гидролесомелиоративных систем, примыкающих мелиоративных систем, полей добычи торфа; общая площадь болот с частично нарушенным гидроло-

гическим режимом составляет около 516 тыс. га;

- зарастание открытых болотных экологических систем древесно-кустарниковой растительностью в результате прекращения их традиционного использования, эвтрофикации поверхностных вод, нарушения гидрологического режима;

- недостаточный учет агроэкологического состояния территорий, особенностей почвенного покрова, влагообеспеченности при планировании посевных площадей на осушенных землях с торфяными почвами, около 318,1 тыс. га земель с торфяными почвами продолжает распахиваться с интенсивной потерей органического вещества;

- наличие около 190,2 тыс. га деградированных земель с торфяными почвами, используемых в сельском хозяйстве, и 283 тыс. га выработанных участков торфяных месторождений площадью более 10 га;

- превышение расхода торфа над приростом в 12 раз – ежегодная потеря торфа в результате сельскохозяйственного использования и добычи торфа составляет 12,8 млн. тонн, а ежегодное накопление торфа в болотах – только 1,04 млн. тонн;

- выделение с торфяников в атмосферу около 16,7 млн. тонн CO₂ (4,45 млн. тонн углерода) ежегодно, тогда как болота поглощают только 0,9 млн. тонн CO₂ (0,23 млн. тонн углерода) в год;

- недостаточное использование биологических ресурсов болот (клюквы, растительной биомассы);

- высокий потенциал возникновения торфяных пожаров при неблагоприятных погодноклиматических условиях (на площади 221,4 тыс. га).

С учетом имеющихся тенденций прогнозируемые изменения биоразнообразия экосистем болот Беларуси проявляться прежде всего в сокращение открытых (нелесных) верховых болот, пойменных болот; уменьшении биотопического (экосистемного) разнообразия болот и упрощение их внутренней пространственной структуры. Прогнозируется, что к 2050 году доля стабильных открытых болот будет составлять около 5% от общей площади, а болотные леса и кустарниковые заросли будут абсолютно доминировать в спектре фитоценотического и экосистемного разнообразия болот – 80,0%.

С целью смягчения последствий экологических проблем, связанных с деградацией торфяников в Беларуси с начала 2000-х гг. началось восстановление гидрологического режима нарушенных торфяников. С 2010 г. восстановлено 40 проектных территории общей площадью 70 тыс. га (17,0% площади нарушенных торфяников).

Основной задачей при вторичном обводнении является подъем уровня воды на большей части восстанавливаемой территории до поверхности земли. Достигается это за счет каскадного



Легенда

Верховые болота

1. Кустарничково-сфагновые (*Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata*, *Calluna vulgaris*) со вторичными озерами и сфагновыми мочажинами (*Sphagnum cuspidatum*, *Sph. balticum*, *Sph. majus*, *Scheuchzeria palustris*, *Rhynchospora alba*, *Carex limosa*) в центре и на склонах, с периферийным рядом мезотрофных и мезоевтрофных ассоциаций
2. Сосново-кустарничково-сфагновые (*Sphagnum divinum*, *Calluna vulgaris*, *Pinus sylvestris* f. *litwinowii*) со сфагновыми мочажинами (*Sphagnum balticum*, *Sph. cuspidatum*, *Eriophorum vaginatum*, *Rhynchospora alba*, *Scheuchzeria palustris*) с периферийным рядом мезотрофных и евтрофных ассоциаций
3. Сосновые (*Pinus sylvestris* f. *litwinowii* и f. *uliginosa*) пушицево-кустарничково-сфагновые (*Sphagnum angustifolium*, *Sph. divinum*, *Ledum palustre*, *Eriophorum vaginatum*)

Переходные болота

4. Осоково-пушицево-травяно-сфагновые (*Carex lasiocarpa*, *C. rostrata*, *Eriophorum vaginatum*, *E. polystachyon*, *Sphagnum fallax*, *Sph. angustifolium*, *Sph. obtusum*, *Sph. papillosum*) обычно в комплексе с редкими кустарничково-сфагновыми (*Andromeda polifolia*, *Oxycoccus palustris*, *Sphagnum divinum*, *Sph. angustifolium*) мезоолиготрофные и мезотрофные
5. Осоково-травяно-сфагновые (*Carex lasiocarpa*, *C. flava*, *C. rostrata*, *C. dioica*, *Menyanthes trifoliata*, *Vaeothryon alpinum*, *Eriopactis palustris*) с большим участием мезоевтрофных видов сфагнов (*Sphagnum warnstorffii*, *Sph. teres*, *Sph. squarrosum*) и с широким распространением *Salix rosmarinifolia*, *S. lapponum*, *Betula humilis*
6. Березово-сосновые и березовые (*Pinus sylvestris*, *Betula pubescens*) кустарничково-осоково-сфагновые (*Carex lasiocarpa*, *C. rostrata*, *Oxycoccus palustris*, *Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum angustifolium*, *Sph. fallax*, *Sph. centrale*, *Sph. flexuosum*, *Sph. divinum*) олигомезотрофные

7. Сосновые и березово-сосновые осоково-травяно-сфагновые (*Calamagrostis canescens*, *Carex appropinquata*, *C. lasiocarpa*, *C. chordorrhiza*, *Comarum palustre*, *Equisetum fluviatile*, *Menyanthes trifoliata*, *Thelypteris palustris*, *Sphagnum warnstorffii*, *Sph. teres*, *Sph. fallax*, *Sph. girgensohnii*)

Низинные болота

8. Осоковые и осоково-гипновые (*Carex lasiocarpa*, *C. rostrata*, *C. diandra*, *C. panicea*, *C. limosa*, *Equisetum fluviatile*, *Peucedanum palustre*, виды рода *Drepanocladus*) иногда с участием сфагнов (*Sphagnum contortum*, *Sph. subsecundum*, *Sph. teres*, *Sph. warnstorffii*) мезоевтрофные
9. Злаково-осоковые и осоково-гипновые (*Carex acuta*, *C. lasiocarpa*, *C. rostrata*, *C. diandra*, *C. elata*, *C. limosa*, *Calamagrostis neglecta*, *C. canescens*, *Calliergonella cuspidata*, *Calliergon giganteum*, *Drepanocladus aduncus*, *D. vernicosus*) евтрофные
10. Влажно-высокотравные (*Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Carex pseudocyperus*, *Cicuta virosa*, *Scirpus sylvaticus*, *Acorus calamus*, *Iris pseudacorus*) евтрофные
11. Ивняки (*Salix aurita*, *S. cinerea*, *S. pentandra*, *S. rosmarinifolia*) мезоевтрофные
12. Березовые и березово-черноольховые (*Betula pubescens*, *Alnus glutinosa*) гирофильнотравяно-осоковые (*Carex acutiformis*, *C. elongata*, *C. pseudocyperus*, *C. vesicaria*, *Equisetum fluviatile*, *Iris pseudacorus*, *Calla palustris*, *Lycopus europaeus*, *Naumburgia thyrsoiflora*, *Thelypteris palustris*)

12а с преобладанием *Betula pubescens*

12б с преобладанием *Alnus glutinosa*

Нарушенные торфяники

13. Нарушенные торфяники верховые
14. Нарушенные торфяники переходные и низинные

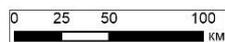


Рис. Карта-схема болот Республики Беларусь (М 1:2 300 000; уменьшенная копия)

перекрытия каналов в соответствии с уклоном поверхности. В ряде случаев проведено повторное заболачивание с восстановлением черноольховых лесов.

Составлен план экологической реабилитации нарушенных торфяников, подлежащих экологической реабилитации в долгосрочной перспективе (до 2040 года). Исходя из результатов планирования представляется необходимым провести экологическую реабилитацию по следующему схеме: в 2022–2030 гг. – 57 объектов (площадь – 46,2 тыс. га); в 2031–2040 гг. – 100 торфяников (общей площадью 210,7 тыс. га).

В результате вторичного обводнения деградированных торфяников прогнозируются следующие экологические эффекты: сокращение объёмов эмиссий парниковых газов (на 633,7 тыс. т CO₂ экв. год⁻¹), сохранение пресной воды (55 млн. м³), реабилитация территорий с высокой пожарной опасностью (73,5 тыс. га), восстановление (8,8 тыс. га) важных для сохранения биоразнообразия местообитаний.

В Беларуси разработан и вступил в силу Закон об охране и использовании торфяников, которыми регулируется порядок и правила экологической реабилитации нарушенных торфяников.

ТОРФЯНИКИ В НАЦИОНАЛЬНОМ КАДАСТРЕ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ**PEATLANDS IN THE NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORY*****В.Н. Коротков¹, А.А. Трунов¹, А.В. Исаева¹, М.А. Медведева²******V.N. Korotkov¹, A.A. Trunov¹, A.V. Isaeva¹, M.A. Medvedeva²***¹ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (г. Москва, Россия)² Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Московская область, Россия)

E-mail: korotkovv@igce.ru

Согласно обязательствам Российской Федерации по Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Киотскому протоколу и Парижскому соглашению ежегодно составляется Национальный кадастр антропогенных выбросов парниковых газов (далее – Кадастр) (Национальный..., 2023). В отчетность по сектору «Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство» (ЗИЗЛХ) включены только управляемые земли, то есть такие территории, на которых потоки парниковых газов находятся под контролем человека. Оценка баланса парниковых газов ведется для управляемых лесных земель, возделываемых земель, кормовых угодий (сенокосы и пастбища), водно-болотных угодий, поселений и прочих земель, а также в случае при переустройстве земельных угодий (изменения землепользования). Особое значение в секторе ЗИЗЛХ имеют антропогенные изменения торфяных болот, которые являются крупнейшим резервуаром долговременного накопления углерода и ведущим природным источником CH_4 на суше (Сирин, 2022).

Целью работы является оценка современного состояния отчетности по торфяникам в Кадастре. К торфяникам относятся все объекты, имеющие или сохранившие торфяную залежь или ее часть, но утратившие болотный растительный покров в результате воздействия человека или других причин (Сирин, 2022).

Согласно рекомендациям МГЭИК в Кадастре необходимо оценивать выбросы парниковых газов (CO_2 , CH_4 и N_2O), связанных с осушением и обводнением органогенных почв, профиль которых состоит из органического материала, преимущественно торфа. Дополнительно учитываются выбросы CO_2 , связанные с выносом растворенного углерода – DOC (dissolved organic carbon) (IPCC, 2014). Органогенные почвы есть практически во всех категориях землепользования. Оценки выбросов имеют значительную неопределенность в связи с высокой неопределенностью коэффициентов выбросов и исходных данных.

Лесные земли (forest land) подвергались осушению с целью повышения продуктивности лесных насаждений. Расчеты выбросов CO_2 , CH_4 и N_2O выполняются с использованием упрощенного подхода (уровень 1) и коэффициентов по умолчанию из руководства МГЭИК (IPCC, 2014) в целом по стране на основе данных по площадям осушенных лесных земель. До 2008 г. такие данные предоставлялись в специализированных формах учета лесного фонда и государственного лесного реестра. С 2009 г. достоверная информация о состоянии гидролесомелиоративного фонда отсутствует, поэтому оценка площади осушенных лесных земель с 2009 г. ведется на основе экстраполяции. Площадь осушенных лесных земель в 1990 г. составляла 2,34 млн га, в 2022 г. площадь оценивалась в 1,87 млн га. Для совершенствования отчетности необходимо получение актуальных данных по площадям осушенных лесных земель в разрезе субъектов РФ, а также уточнения коэффициентов выбросов с учетом региональной специфики. В лесах России наблюдается сокращение выбросов CO_2 , CH_4 и N_2O от осушенных органогенных почв с 8,5 млн т CO_2 -экв. в 1990 г. до 6,8 млн т CO_2 -экв. в 2022 г. в связи с недостаточным объемом работ по поддержанию мелиоративной сети и сокращению площадей осушенных лесных земель.

Возделываемые земли (cropland) также включают осушенные органогенные почвы, площадь которых в 1990 г. составляла 3,81 млн га, в 2022 г. – 2,50 млн га. Расчеты выбросов CO_2 и CH_4 выполняются с использованием упрощенного подхода и коэффициентов по умолчанию (IPCC, 2014) в целом по стране на основе данных по площадям осушенных пахотных угодий и многолетних культур. Выбросы парниковых газов сократились с 88,4 млн т CO_2 -экв. в 1990 г. до 57,8 млн т CO_2 -экв. в связи с сокращением площади возделываемых земель. Необходимы уточнения исходных данных и коэффициентов выбросов.

Кормовые угодья (сенокосы и пастбища) включают осушенные органогенные почвы, площадь которых в 1990 г. составляла 2,40 млн га, в 2022 г. – 1,76 млн га. Расчеты выбросов CO₂ и CH₄ выполняются с использованием коэффициентов по умолчанию (IPCC, 2014) в целом по стране на основе данных по площадям осушенных сенокосов и пастбищ. Выбросы парниковых газов сократились с 53,9 млн т CO₂-экв. в 1990 г. до 39,5 млн т CO₂-экв. в 2022 г.

Водно-болотные угодья (wetlands, ВБУ). К управляемым ВБУ относятся осушенные торфоразработки и вторично обводненные торфяники. Согласно имеющимся данным, для периода с 1990 г. по 2008 г. площадь торфоразработок, включая действующие и выработанные месторождения, принята равной 316,6 тыс. га, для периода 2009–2022 гг. – 342,0 тыс. га. Выбросы CO₂, CH₄, N₂O рассчитывается в соответствии с методом Уровня 1 и коэффициентами, рекомендованными в руководстве МГЭИК по водно-болотным угодьям (IPCC, 2014). Выбросы парниковых газов составили 3,9 млн т CO₂-экв. в 1990 г. и 4,0 млн т CO₂-экв. в 2022 г.

Расчеты выбросов CO₂ и CH₄ от вторично обводненных торфяников выполнены на основе данных, представленных Центром сохранения и восстановления болотных экосистем Института лесоведения РАН (Сирин и др., 2023), результаты представлены в Кадастре, начиная с 2021 г. (Национальный..., 2023). Общая площадь обводненных торфяников в 2022 г. составила 16,8 тыс. га, суммарная эмиссия – 152,4 тыс. т CO₂-экв. Обводнение торфяников обеспечивает снижение выбросов на 2,5 т CO₂-экв. га⁻¹ по сравнению с осушенными торфяниками (без учета сокращения выбросов от торфяных пожаров).

Учитывая значительный объем выбросов от осушенных торфяников, встречающихся практически во всех типах земельных угодий, необходимо совершенствование Кадастра, включающее уточнение коэффициентов выбросов парниковых газов и исходных данных по площадям в региональном разрезе. Кроме того, существует пробел в оценке выбросов от пожаров на осушенных торфяниках, что связано с отсутствием исходных данных, хотя разработаны подходы к их получению (Сирин и др., 2022).

Работа выполнена в рамках научной темы 3.3 Росгидромета (ФГБУ «ИГКЭ») «Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически-активных веществ», а также в рамках реализации ВИП ГЗ «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)».

1. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. / Романовская А.А., Нахутин А.И., Гинзбург В.А., Грабар В.А., Имшенник Е.В., Коротков В.Н., Бакурова Э.Ю., Вертянкина В.Ю., Григурина Т.В., Говор И.Л., Исаева А.В., Литвинчук Г.Г., Лытов В.М., Полумиева П.Д., Попов Н. В., Сорокина Д.Д., Трунов А.А., Прохорова Л.А. – Москва: Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю.А. Израэля, 2022. – 479 с. – <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/>.
2. Сирин А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю. Вторичное обводнение неиспользуемых осушенных торфяников и сокращение выбросов парниковых газов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 4. – С. 597–618. – DOI 10.31857/S258755662304012X.
3. Сирин А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю., Макаров Д.А., Коротков В.Н. Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 10. – С. 33–45. – DOI 10.52002/0130-2906-2022-10-33-45.
4. Сирин А.А. Болота и антропогенно-измененные торфяники: углерод, парниковые газы, изменение климата // Успехи современной биологии. – 2022. – Т. 142, № 6. – С. 560–577. – DOI 10.31857/S0042132422060096.
5. IPCC, 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands / Eds T. Hiraiishi, T. Krug, K. Tanabe et al. Switzerland: IPCC, 2014. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html>
6. IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. V. 4. Agriculture, forestry and other land use / Eds E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc et al. Switzerland: IPCC, 2019. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПОЛЕВОЙ СТАЦИОНАР МУХРИНО – ПОЛИГОН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL FIELD STATION MUKHRINO FOR STUDYING THE CARBON BALANCE: MAIN TRENDS AND RESEARCH RESULTS

*Е.Д. Лапшина¹, Е.А. Дюкарев^{1,2}, Е.А. Заров¹, А.Ф. Сабреков¹, Ю.В. Куприянова¹,
Д.В. Ильясов¹, А.В. Ниязова¹, А.А., Филиппова Н.В¹*

¹ Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

E-mail: e_lapshina@ugrasu.ru

Одной из наиболее важных биосферных функций торфяных болот является связывание углекислого газа и депонирование углерода в торфяной залежи. Запасы углерода в торфяниках оцениваются в 547 (473-621) Гт, что составляет около трети мировых запасов почвенного углерода и более половины запасов углерода в атмосфере Земли (Yu Z. et al., 2010). Биосферная роль болот в глобальном цикле углерода обусловлена особенностями их углеродного баланса. В отличие от всех других типов наземных экосистем болотные экосистемы характеризуются незамкнутым циклом круговорота веществ. Болота в их естественном состоянии ежегодно возвращают в окружающую среду меньше углерода, чем забирают его в процессе фотосинтеза. В них постоянно идет сток углерода из атмосферы, который накапливается в виде торфа.

Свои исследования запасов и динамики накопления углерода болотными экосистемами Западной Сибири мы начали в рамках международных проектов в конце 90х годов совместно с коллегами из Томского государственного университета, Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Института леса им. Н.В Сукачева СО РАН, Института географии РАН и западными партнерами из университета Утрехт (Нидерланды) и ботанического института университета Грайсвалд (Германия). Для оценки накопления углерода современными болотными экосистемами определяли первичную продукцию надземной и подземной фитомассы и проводили измерения потоков CO₂ и метана ручными камерами на серии ключевых участков (Bleuten, Lapshina, 2001). Результатом этих исследований помимо выявленных закономерностей накопления углерода болотами в зависимости от биоклиматической зоны, типа торфяной залежи и положения точки отбора образцов в пределах болотного массива, сфор-

мировалось понимание того, что для изучения углеродного баланса современных болотных экосистем необходима организация режимных многолетних измерений потоков парниковых газов.

С этой целью в 2009 году в 25 км от Ханты-Мансийска был создан международный полевой стационар «Мухрино». В 2021 году стационар получил статус Карбонового полигона. С 2022 года он является тестовым полигоном интенсивного уровня 1 типа в рамках одного из направлений Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ), которое направлено на разработку национальной системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации (РИТМ углерода).

В настоящее время стационар располагает уникальной инфраструктурой, включающей систему деревянных мостков, автономную систему энергоснабжения, автоматические метеостанции, атмосферно-почвенные измерительные комплексы для мониторинга микроклиматических характеристик, сеть датчиков уровня болотных вод, современное оборудование для измерения парниковых газов (ПГ) и изучения углеродного баланса, включая мониторинг всего комплекса экологических факторов и биоты, определяющих объем поглощения и эмиссии углекислого газа и метана.

Стационар «Мухрино» имеет большое значение в формировании фондов Биологической коллекции Югорского государственного университета (YSU), зарегистрированной в Index Herbariorum и GBIF. Территория полигона является модельной площадкой для изучения состава и структуры сообществ грибов – основных деструкторов органического вещества верховых болот. Многолетний мониторинг, проводимый классическим методом на постоянных площадках в теч-

нии 10 лет, в последние годы дополнен методом анализа тотальной ДНК из различных субстратов (торф, опад растений, микоризные окончания и др.) (Filipova et al., 2023b, 2024). На полигоне проводятся измерения прироста и первичной продукции сфагновых мхов (Filipova et al., 2023a; Filipova, Kosykh, 2024), а также скорости разложения основных растительных субстратов (Filipova, 2023).

Для болотного массива Мухрино проведены прямые измерения запасов углерода во всех компонентах болотных экосистем (древесный ярус, напочвенный покров (надземная и подземная фитомасса), торфяной горизонт до глубины 1 м) для четырёх наиболее распространённых в средней тайге Западной Сибири типов болотных фаций: типичный рям (сосново-кустарничково-сфагновое болото с доминированием *Sphagnum fuscum*), рямово-мелкомочажинный комплекс, грядово-мочажинный комплекс (ГМК), кустарничково-пушицево-сфагновое открытое болото. Суммарный запас углерода в этих типах фаций составляет от 25.1 до 32.5 кгС/м² и отличается между типами незначительно ($p = 0,067$ для дисперсионного анализа). Роль древесного яруса в болотных сообществах (рям, гряды ГМК) не велика. Запас углерода в древостое не превышает 3.4 % от суммарного. Наибольший вклад вносит слой торфа на глубинах от 30(40) см до 100 см.

На стационаре разрабатывается система дистанционной оценки запасов фитомассы. Выполнена идентификация параметров простейшей регрессионной модели связи запасов фитомассы травяно-мохово-кустарничкового и древесного яруса болотных сообществ и характеристик подстилающей поверхности (вегетационный индекс GRVI, высокодетальная цифровая модель местности), уточненных путем проведения лидарной съемки на малых высотах при помощи беспилотного воздушного судна (БВС). При использовании наземной оценки высот растений и их проективного покрытия коэффициент детерминации достигал для травяно-кустарничкового яруса 0.8 для древесного яруса – 0.9. В дальнейшем разработанная методика позволит проводить дистанционную оценку запасов углерода в фитомассе болотных экосистем с высокой точностью без проведения наземных работ. Установлена связь запасов фитомассы и компонентов углеродного баланса в изученных экосистемах (Ilyasov et al., 2023).

Измерение потоков углекислого газа, водяного пара и тепла методом турбулентных пульсаций проводятся на трех станциях наблюдений: в типичном грядово-мочажинном комплексе в центральной части олиготрофного болота Мухрино (МУН1), в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе (ряме) (МУН2), в смешанном темнохвойно-осиновом мелкотравно-зеленомошном

лесу, оборудованных вышками Eddy Covariance (EC) высотой 7, 10 и 40 м соответственно. У каждой вышки установлены камерные автоматические системы мониторинга (КАСМ-8) потоков CO₂, включающие по 8 прозрачных камер 50 x 50 x 50 см, газоанализатор Li-850 (CO₂, H₂O) и модуль прокачки и сбора данных.

По данным с вышек EC кумулятивный чистый экосистемный обмен (cNEE) составил за вегетационный сезон в грядово-мочажинном комплексе 128–110 гС/м² (2022–2023), а в ряме – 154 гС/м² (2023), соответственно 93–87 и 94 гС/м² за год (Dyukarev et al., 2021). При этом наблюдается высокая пространственная неоднородность потоков CO₂ в пределах болотного массива, выявляемая камерным методом. Суммарное поглощение углерода в течение вегетационного периода в осоково-шейхцерицево-сфагновых мочажинах примерно в два раза выше (107,5 гС/м²), чем на сосново-кустарничково-сфагновых грядах (51 гС/м²) (Dyukarev et al., 2019).

Значимые скорости эмиссии метана наблюдаются только в болотных экосистемах с уровнем воды расположенным вблизи поверхности. По сравнению с углекислым газом вклад эмиссии углерода с потоками метана в общий углеродный баланс по данным с камерных измерений не превышает 10 % (обычно 2–5 %). Эмиссия метана из болотных экосистем идет в течение всего года, летом быстрее, зимой медленнее. По данным с вышки EC (МУН1) суммарно в центральной части болота выделяется до 14 гС/м² метана в год, что в пересчете на углерод составляет около 10 гС/м². Это несколько снижает суммарный кумулятивный чистый экосистемный обмен (cNEE) до 83–77 гС/м² в год, но даже с учетом выделения метана болото остается поглотителем углерода. Однако кумулятивный потенциал глобального потепления (GWP – Global Warming Potential), который складывается из потока CO₂ и потока CH₄, GWP которого в 28 раз выше, чем у CO₂, показывает, что болото охлаждает атмосферу с июля по сентябрь (GWP<0), но нагревает ее в годовом масштабе. Потенциал потепления составляет 63–76 гCO₂эквивалент/м².

В результате детального изучения торфяной залежи, комплексного подхода к реконструкции поверхностного увлажнения болота Мухрино и скорости накопления углерода за весь период его развития, выявлены основные стадии развития болота и палеоэкология региона, начиная с раннего голоцена (около 9360 лет назад) до настоящего времени (Tsyganov et al, 2021).

Для совмещения значений углеродного баланса современных болотных экосистем с динамикой накопления углерода в долговременном масштабе необходимо также учитывать потери растворенного углерода (POУ) с поверхностным

и грунтовым стоком. Для этого на стационаре ведутся прямые измерения объемов латерального стока РОУ и предпринята попытка оценить величину вертикальной миграции РОУ вглубь торфяной залежи (Zarov et al., 2022, 2023). Всего за весенне-осенний период с локального водосбора площадью около 1 км² потери составили 9.5 т РОУ, что соответствует величине латерального стока 7 гС/м² в год. Скорость вертикальной миграции растворенного органического углерода вглубь торфяной залежи по нашим оценкам может составлять 0.03–0.4 г/м² в год.

Динамика накопления углерода в разные периоды голоцена непосредственно связана с изменениями климата (соотношением тепла и влаги) и закономерной сменой типов болотных

биогеоценозов в процессе торфонакопления и их водно-минерального питания. Углеродный баланс современных болотных экосистем напрямую зависит от погодных условий и весьма изменчив в пространстве и во времени, чем длиннее временной ряд наблюдений, тем точнее значение величины стока углерода и накопления его в виде торфа. Для разработки адекватной модели поглощающей способности атмосферного углерода болотными экосистемами с высоким прогностическим потенциалом необходимо совместить актуальные значения углеродного баланса основных типов болот в разных биоклиматических зонах со среднемноголетними данными накопления углерода за последнее тысячелетие и в разные периоды голоцена.

Работы проводятся в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (консорциум «Ритм углерода»).

1. Bleuten W., Lapshina E.D. (eds) Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht, Tomsk, 2001. 172 p.
2. Dyukarev E., Godovnikov E., Karpov D., Kurakov S., Lapshina E., Filippov I., Filippova N., Zarov E. 2019. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog. *Geography, Environment, Sustainability*, 12 (2): 227-244. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-77>
3. Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Filippov I., Bleuten W., Khoroshavin, V., Ganasevich G., Meshcheryakova A., Vesala T., 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*. <https://doi.org/10.3390/land10080824>
4. Ilyasov D.V., Meshcheryakova A.V., Glagolev M.V., Kupriianova I.V., Kaverin A.A., Sabrekov A.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).
5. Filippova N.V., Kosykh N.P. 2024. Sphagnum annual growth and primary production measurements (Mukhrino field station, West Siberia) (2018-2023). Version 1.13. Yugra State University Biological Collection (YSU BC). Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/fcz7> at accessed via GBIF.org on 2024-02-01.
6. Filippova N.V., Zvyagina E., Rudykina E.A., Ishmanov T.F., Filippov I.V., Bulyonkova T.M., Dobrynina A.S. 2024. DNA-based occurrence dataset on peatland fungal communities studied by metabarcoding in north-western Siberia. *Biodiversity Data Journal* 12: e119851. <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e119851>
7. Filippova N.V., Kosykh N.P., Filippov I.V., Meshcheryakova A.V. 2023a. Annual growth and primary production of sphagnum in raised bog “Mukhrino” (four-years observation: 2019-2022). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14 (1). <https://doi.org/10.18822/edgcc472141>
8. Filippova N., Zvyagina E., Rudykina E., Dobrynina A., Bolshakov S. 2023b. The diversity of macromycetes in peatlands: nine years of plot-based monitoring and barcoding in the raised bog «Mukhrino», West Siberia. *Biodiversity Data Journal* 11: e105111. <https://doi.org/10.3897/BDJ.11.e105111>
9. Tsyganov A.N., Zarov E.A., Mazei Yu.A., Kulkov M.G., Babeshko K.V., Yushkovets S.Y., Payne R.J., Ratcliffe J.L., Fatyunina Yu.A., Zazovskaya E.P., Lapshina E.D. 2021. *Ambio*, 50:1896–1909. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01545-7>
10. Zarov E.A., Meshcheryakova A.V., Shanyova V.S., Khoroshavin V.Yu. 2022. Water table and dissolved organic carbon seasonal dynamic at the different ecosystems of the ombrotrophic bog (Mukhrino, West Siberia). In: *Smart and Sustainable Urban Ecosystems: Challenges and Solutions*. 10.1007/978-3-031-37216-2_14
11. Zarov E.A., Lapshina E.D., Kuhlmann I., Schulze D. 2023. Carbon Accumulation and the Possibility of Carbon Losses by Vertical Movement of Dissolved Organic Carbon in Western Siberian Peatlands. *Forests* 2023, 14(12). 10.3390/f14122393
12. Yu Z. et al. 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37. L13402.

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: РОЛЬ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СМЯГЧЕНИЯ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

MODERN CLIMATE CHANGE: THE ROLE OF NATURE-BASED CLIMATE SOLUTIONS IN MITIGATING CLIMATE CHANGE

А.В. Ольчев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)
Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)
E-mail: aoltche@yandex.ru

Климат на Земле постоянно меняется под влиянием различных внешних и внутренних факторов. Отличительной особенностью современных изменений климата является наблюдаемый в течение последних десятилетий беспрецедентный рост глобальной температуры. По данным итогового доклада международной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2022), средний рост глобальной температуры в настоящее время составил около 1.1°C по сравнению с доиндустриальным периодом (1850-1900 гг.), а средняя глобальная температура на Земле достигла 14.8°C. При этом только за период с 2010 по 2020 год рост средней глобальной температуры достиг 0.25°C. Большинство экспертов по изменению климата связывают наблюдаемые в последние десятилетия резкие климатические изменения со значительным увеличением содержания парниковых (климатически активных) газов (диоксида углерода, метана, закиси азота, гексофторида серы, фреонов и др.) в атмосфере, прежде всего из-за стремительного роста их выбросов от антропогенных источников.

Природные экосистемы, обладают значительным потенциалом регулирования атмосферного баланса парниковых газов. В частности, растительные сообщества обладают способностью к поглощению диоксида углерода из атмосферы при фотосинтезе и его дальнейшей секвестрации в почвенном покрове. Поглощая парниковые газы из атмосферы, природные экосистемы могут служить также и достаточно мощным их источником.

Важно отметить, что рассматривая парниковые газы в качестве основного драйвера современного глобального потепления необходимо учитывать, что кроме парниковых газов, на климат оказывает влияние еще целый комплекс природных и антропогенных факторов, определяющих радиационный, тепловой и водный обмен земной поверхности с атмосферой. Изменение альбедо (отражательной способности) поверхности может

в отдельно взятой экосистеме существенно (на несколько градусов) изменить ее среднемесячную или среднегодовую температуру в сторону как ее увеличения, так и ее уменьшения. Водяной пар, являясь основным парниковым газом в атмосфере, и поступающий в атмосферу как за счет испарения влаги с поверхности пресноводных водоемов, морей, океанов, так и за счет транспирации наземных растений и испарения с поверхности почвы, также может привести к существенным как положительным, так и отрицательным температурным изменениям в региональном и глобальном масштабе. Охлаждающий эффект водного пара связан с образованием облачности, экранирующей поступление солнечной радиации к земной поверхности. Важную роль в формировании климата, и температурного режима оказывают и аэрозоли.

Таким образом, при выборе стратегии по смягчению последствий современных климатических изменений очень важно не ограничиваться рассмотрением влияния на климат только ключевых парниковых газов, таких как диоксид углерода, а рассматривать весь комплекс внешних и внутренних факторов (радиационный, тепловой, водный, углеродный балансы земной поверхности), влияющих на климатические условия, учитывать сложную систему прямых и обратных связей, возникающих между подстилающей поверхностью и климатической системой.

Для смягчения последствий современных климатических изменений важную роль могут сыграть природно-климатические решения. Направление их деятельности в контексте современной климатической повестки связано с защитой, сохранением, восстановлением и управлением природными и антропогенно измененными наземными экосистемами, включая их адаптацию к современным изменениям климата. Принято считать, что природные климатические решения могут обеспечить более 30% экономически эффективных митигационных мер, необходимых к

2030 году для стабилизации глобального потепления ниже 2°C по сравнению с доиндустриальным периодом. Среди возможных подходов для контроля эмиссии и поглощения парниковых газов природными экосистемами рассматривается широкий спектр мероприятий, предполагающий различные сценарии и стратегии восстановления природных экосистем, их эффективного использования и рационального управления.

Для достижения максимальной эффективности природно-климатических проектов важно опираться при их планировании и реализации на опыт широкого круга специалистов, работающих в различных научных областях, включая экологию, экономику, биологию, метеорологию, почвоведение, океанологию, агрономию, а также многие другие научные направления.

**Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed mire ecosystems.
Biogeochemistry of peats and mire waters**

Greenhouse gas emissions

**Биогеохимические циклы
естественных
и антропогенно-нарушенных
болотных экосистем.
Биогеохимия торфов
и болотных вод.**

Эмиссия парниковых газов

STUDYING FOR GREENHOUSE GAS FLUXES FROM THE WETLAND ECOSYSTEMS BY APPLICATION OF AUTOMATED METHODS

B.D. Belan¹, D.K. Davydov¹, E.A. Dyukarev^{2,3}, A.A. Plotnikov¹, A.V. Fofonov¹

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (Tomsk, Russia)

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk, Russia)

³Yugra State University (Khanty-Mansiysk, Russia)

e-mail: alenfo@iao.ru

The use of automated systems when studying greenhouse gas (GHG) fluxes allows accurate measurements at minimal disturbance of the soil surface to be carried out and high resolution datasets for extended periods of time to be obtained. Due to the above advantages, chamber measurements play an important role while establishing long-term observations in the framework of such research infrastructures as Integrated Carbon Observation System (ICOS).

However, in last decade the eddy covariance (EC) technique has become the standard method to estimate net carbon dioxide (CO₂) exchange between the atmosphere and soil, plant organs or complete ecosystems.

CO₂ and CH₄ fluxes from Bakchar bog at the field station Plotnikovo, West Siberia, were measured by means of a solar powered automated system (Flux-NIES) consisted of six static chambers installed along the transect and connected to the LI-820 NDIR analyzer and modified commercial methane sensor TGS-842, respectively. Alongside, EC complex was installed for work in 2022 year.

Complex consisted from open-trace LI-7500DS analyzer, METEK uSonic-3 anemometer and set of sensors for measurements incoming/reflected solar radiation, heat and moisture fluxes.

Parallel observations were carried out during the growing season (from May to October) in 2023 at the hollow-ridge landscape nearby tiny lake (O-site). A good agreement was found between seasonal CO₂ fluxes obtained by different measurement methods.

The seasonally integrated net CO₂ uptake shows that Siberian wetland ecosystems are a strong sink of atmospheric carbon. Drier environmental conditions lead to a decreasing carbon sink and higher soil water content enhances the net CO₂ uptake efficiency. Similar effect was revealed for methane emissions.

GHG fluxes have a local spatial variability: higher net CO₂ uptake are observed in ridges with higher photosynthesis and respiration rates; higher CH₄ emissions are observed at wet mesotrophic locations. Steady seasonal CO₂ emission revealed for bog's lake surface.

The study is supported by the most important innovative project of national importance "Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems" (Registration number: 123030300031-6).

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА С МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ НА ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

RELATIONSHIP BETWEEN CARBON DIOXIDE EMISSION AND MICROBIOLOGICAL, PHYSICAL, CHEMICAL FEATURES OF AN OLIGOTROPHIC PEATLAND IN SOUTH KARELIA

Е.Н. Гуляева, Е.В. Линкевич, В.М. Прокопюк, Л.А. Ефимова
E.N. Gulyaeva, E.V. Linkevich, V.M. Prokoryuk, L.A. Efimova

Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр
Российской академии наук» (г. Петрозаводск, Россия)
E-mail: gln7408@gmail.com

Болотные экосистемы бореальной зоны играют важную роль в круговороте углеродсодержащих газов, функционируя как нетто-сток атмосферного диоксида углерода. Однако обмен данного газа может значительно изменяться в зависимости от ряда климатических факторов, географического положения и уровня антропогенной нагрузки (Вомперский и др., 2005). Глобальное изменение климата, включающее увеличение средней годовой температуры может оказать существенное влияние на характер выбросов углерода в атмосферу в виде парниковых газов. Кроме этого потепление климата влечет за собой увеличение микробной активности и рост биомассы сосудистых растений, что может привести к механизму положительной обратной связи и значительному высвобождению углерода (IPCC, 2013).

Республика Карелия является одним из наиболее заболоченных регионов, болота здесь занимают 3,63 млн. га (более 27 % от всей территории республики) (Елина и др., 1984). По многолетним наблюдениям в Карелии отмечается линейный рост температур с 80-х годов. Анализ линейных трендов показал, что скорость роста температуры в северной агроклиматической зоне Карелии составила 0,63 °C/10 лет, в южной – 0,54 °C/10 лет. Однако исследования эмиссии углеродсодержащих газов в болотных экосистемах на территории Республики Карелия и ее связи с микроклиматическими и микробиологическими показателями ограничены.

В нашем исследовании мы рассмотрели особенности эмиссионной активности олиготрофного болота бореальной зоны Северо-Западной территории России в течение вегетационного периода.

В качестве объекта исследования выбран участок олиготрофного сосново-кустар-

ничково-пушицево-сфагнового болота Близкое (62°26'83" N, 33°99'45" E) расположенного в государственном природном заповеднике «Кивач» (Кондопожский район, Республика Карелия). Глубина торфяной залежи болота Близкое в месте составляла 4,5 м. В ее слоении отмечены травяной и древесно-травяной виды торфа. Степень разложения торфов верхних горизонтов изменялась в пределах 12 – 15%. На глубине более 4,5 м степень разложения достигала 40 – 55%. Распределение количества зольных элементов неравномерно и варьировалась от 1,0 до 3,5% на глубине до 1,5 м, и от 4,0 до 18,0% – от 1,5 до 6.0 м. Для болота определена низкая обменная кислотность pH_{KCl} 2,8. Содержание углерода в верхних горизонтах составляло от 45 до 47% в пересчете на органическое вещество торфяной залежи.

Измерения почвенной эмиссии диоксида углерода проводились в период с мая по сентябрь 2023 г. с использованием инфракрасного газоанализатора SF-9000 (LICA, Китай). Величину эмиссии парниковых газов регистрировали один раз в месяц каждые 2-3 часа в течение суток в мае-июне и 3 раза в час в течение суток с июля по сентябрь. Всего было проведено 768 измерений с использованием 4-х камер. Одновременно с помощью газоанализатора регистрировали объемную влажность в верхнем 10-сантиметровом слое торфяной залежи ($W_{об}$, %) и температуру в верхнем 10-сантиметровом слое торфяной залежи ($T_{тз}$, °C).

Микроклиматические факторы (температура атмосферного воздуха ($T_{атм}$, °C), атмосферное давление ($P_{атм}$, Па), относительная влажность воздуха ($W_{отн}$, %), количество осадков (мм), точка росы (T_p , °C)), влияющие на формирование потоков парниковых газов, оценивали переносной ме-

теостанцией SOKOL M1 (ГК «Эскорт», Россия) на высоте 1,5 м.

Образцы торфа для микробиологического анализа отбирали после измерения эмиссии на глубине 10-20 см с участка торфяной залежи, где предварительно были удалены надземные части растений. Образцы транспортировали в лабораторию, просеивали и хранили при температуре 4 °С.

Базальное дыхание (БД) почвы определяли по выделению диоксида углерода (Ананьева и др., 2008). Навеску почвы 1 г помещали в стеклянные флаконы объемом 20 мл, добавляли дистиллированную воду (0,1 мл/г почвы), герметично закрывали и инкубировали при 22 °С в течение 24 часов. После инкубации образца почвы измеряли концентрацию CO₂ газовой фазы флакона при помощи газового хроматографа Хроматэк-Кристалл 5000 (ЗАО СКБ «ХРОМАТЭК», Россия) с детектором по теплопроводности. Субстрат-индуцированное дыхание (СИД) определяли аналогично

базальному дыханию, где заменяли дистиллированную воду раствором глюкозы (0,1 мл/г) и инкубировали в течение 4 часов (Ананьева и др., 2008). Содержание углерода микробной массы (С_{мик}, мкг/г почвы) оценивали по СИД согласно Anderson and Domch (1993) с модификацией Ананьевой с соавторами (2008).

Эмиссия CO₂ с поверхности торфяной залежи варьировала от 0,7 до 3,9 г CO₂/(м²×сут) (рис. 1). В среднем наибольшую почвенную эмиссию диоксида углерода за вегетационный сезон регистрировали в июне, меньшую – в сентябре. Среднесуточная температура атмосферного воздуха на болоте за наблюдаемый период варьировала от 10,0 до 18,9 °С. Среднесуточная относительная влажность атмосферного воздуха изменялась от 44,0 до 72,5 % и составила в среднем 62,6 % за наблюдаемый период. Относительная влажность торфяной почвы изменялась в пределах 89,0 – 94,0%.

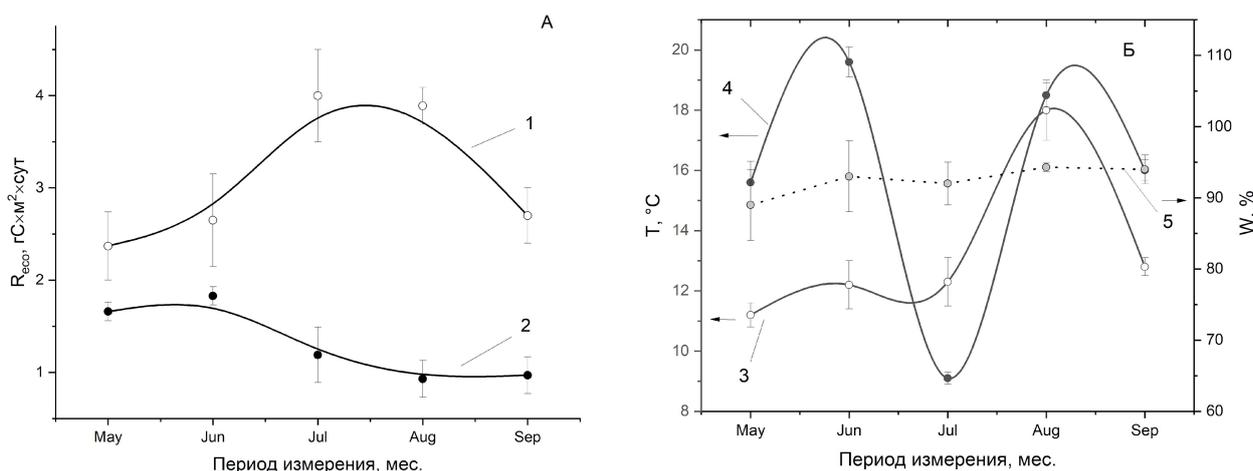


Рис 1. Временная динамика эмиссии CO₂ с поверхности торфяной залежи (А), температуры и влажности торфяной залежи в слое от 0-10 см и атмосферного воздуха над поверхностью (Б) на участке олиготрофного болота Ближкое: 1 – экосистемное дыхание на межкочье; 2 – экосистемное дыхание на «моховом ковче»; 3 – среднесуточная температура торфяной почвы; 4 – среднесуточная температура атмосферного воздуха; 5 – среднесуточная величина объемной (относительной) влажности

Содержание С_{мик} верхнего 10-сантиметрового слоя торфяной залежи значительно изменялось за наблюдаемый период и варьировало от 355 (май) до 1144 мкг С/г (август) (рис. 2). Скорость БД торфяной залежи составила за наблюдаемый период от 4,2 до 4,7 мкг CO₂-С/(г×ч). При этом скорость БД была выше в августе.

По результатам эмиссии CO₂, С_{мик} и БД с поверхности болота был проведен статистический анализ и рассчитаны коэффициент корреляции r-Пирсона и уровень достоверности (р). Эмиссия CO₂ с поверхности олиготрофного болота за вегетационный период положительно коррелировала с С_{мик} и БД слоя 0–10 см, где составляло r = 0,54 и 0,74 соответственно (табл. 1).

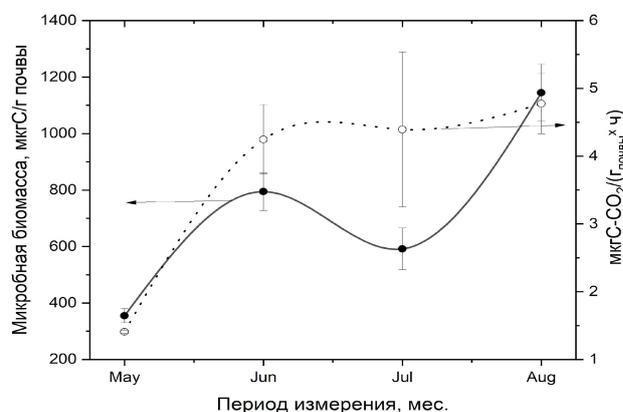


Рис 2. Содержание углерода микробной биомассы и скорость базального дыхания (С_{мик} и БД) олиготрофного болота Ближкое

Также показана тесная связь эмиссии диоксида углерода и базального дыхания от ряда микроклиматических показателей, таких как тем-

пература и влажность верхнего слоя торфяной залежи, атмосферного давления и амплитуды температуры воздуха (табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчета корреляционного коэффициента Пирсона (r_p) и уровень значимости (p)

		Reco	БД	СИД	$T_{\text{почвы}}$	$T_{\text{атм.}}$	W, %	P, Па	ΔT
Reco	r_p	1	0,74514	0,5379	0,61527	-0,4569	0,62077	0,63769	-0,64255
	p	--	0,25486	0,4621	0,38473	0,5431	0,37923	0,36231	0,35745
БД	r_p	0,74514	1	0,80148	0,59708	0,03609	0,94433	0,49667	-0,92347
	p	0,25486	--	0,19852	0,40292	0,96391	0,05567	0,50333	0,07653
СИД	r_p	0,5379	0,80148	1	0,90552	0,49993	0,94806	0,81751	-0,96948
	p	0,4621	0,19852	--	0,09448	0,50007	0,05194	0,18249	0,03052
$T_{\text{почвы}}$	r_p	0,61527	0,59708	0,90552	1	0,35892	0,76374	0,98429	-0,82102
	p	0,38473	0,40292	0,09448	--	0,64108	0,23626	0,01571	0,17898
$T_{\text{атм.}}$	r_p	-0,4569	0,03609	0,49993	0,35892	1	0,33362	0,25584	-0,34239
	p	0,5431	0,96391	0,50007	0,64108	--	0,66638	0,74416	0,65761
W, %	r_p	0,62077	0,94433	0,94806	0,76374	0,33362	1	0,6536	-0,99556
	p	0,37923	0,05567	0,05194	0,23626	0,66638	--	0,3464	0,00444
P, Па	r_p	0,63769	0,49667	0,81751	0,98429	0,25584	0,6536	1	-0,7218
	p	0,36231	0,50333	0,18249	0,01571	0,74416	0,3464	--	0,2782
ΔT	r_p	-0,64255	-0,92347	-0,96948	-0,82102	-0,34239	-0,99556	-0,7218	1
	p	0,35745	0,07653	0,03052	0,17898	0,65761	0,00444	0,2782	--

Таким образом, в период с мая по сентябрь 2023 года между эмиссией CO_2 торфяной залежи олиготрофного болота и ее микробиологическими свойствами показана тесная взаимосвязь. Вклад микробиологического дыхания на болоте Близкое составил 40 %, что согласуется с данными литературы, где доля микробного дыхания почвы (при механическом изолировании корней) составляет в среднем от 29 до 96 % (Евдокимов и др., 2010; Subke et al., 2006). Принимая во внимание,

что примерно половина потока диоксида углерода торфяной залежи на изученном бореальном олиготрофном болоте обеспечивается дыханием микроорганизмов, которые также находятся в тесной связи с микроклиматическими условиями среды, отбор образцов торфяной залежи в вегетационный период с мая по август с последующим измерением их базального дыхания в лабораторных условиях может служить индикаторным показателем эмиссионной активности торфяной залежи.

Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы КарНЦ РАН №FMEN-2022-0018.

1. Ананьева Н. Д., Полянская Л. М., Сусьян Е. А., Васенкина И. В., Вирт С., Звягинцев Д. Г. Сравнительная оценка микробной биомассы почв, определяемой методами прямого микроскопирования и субстрат-индуцированного дыхания // Микробиология. – 2008. – Т. 77. – №. 3. – С. 404-412.
2. Вомперский С. Э., Сирина А. А., Цыганова О. П., Валяева Н. А., Майков Д. А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия Российской академии наук. – 2005. – №. 5. – С. 39-50.
3. Евдокимов И. В., Ларионова А. А., Шмит М., Лопес де Гереню В. О., Бан М. Определение вклада дыхания корней растений в эмиссию CO_2 из почвы методом субстрат-индуцированного дыхания // Почвоведение. – 2010. – № 3. – С.349–355.
4. Елина Г. А., Кузнецов О. Л., Максимов А. И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии / Г. А. Елина, О. Л. Кузнецов, А. И. Максимов; отв ред. Н. И. Пьявченко. – Ленинград: Наука: Ленингр. отд-ние, 1984. – 128 с.

5. Anderson T. H., Domsch K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils //Soil Biology & Biochemistry. – 1993. –V. 25(3). – P. 393-395
6. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 28 p.
7. Subke J.A., Ingima I., Cotrufo M.F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A metaanalytical review //Global Change Biology. – 2006. – V.12. – P. 921–943.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ЧИСТЫМ ЭКОСИСТЕМНЫМ ОБМЕНОМ БОЛОТ НА ПОЛЕВОМ СТАЦИОНАРЕ МУХРИНО В 2022-2023 ГГ.

TWO YEAR OBSERVATIONS OF EDDY-COVARIANCE NET ECOSYSTEM EXCHANGE AT MUKHRINO PEATLAND

*Е.А. Дюкарев^{1,2,3}, А.А. Дмитриченко¹, Е.А. Заров¹, А.А. Кулик¹, Е.Д. Лапшина¹
Е.А. Dyukarev^{1,2,3}, А.А. Dmitrichenko¹, Е.А. Zarov¹, А.А. Kulik¹, Е.Д. Lapshina¹*

¹ Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (г. Москва, Россия)

e-mail: dekot@mail.ru

Болота Западной Сибири содержат огромные запасы углерода и в естественном состоянии являются эффективным стоком для углекислого газа и значительным источником метана. Наблюдающиеся изменения климата влекут за собой изменение бюджетов тепла и влаги болот, которые в свою очередь определяют углеродный цикл болот, величину и направление потоков углекислого газа и метана. В докладе представлены результаты наблюдений за потоками парниковых газов, тепла и влаги на научно-полевой станции Мухрино в 2022-2023 гг (Ханты-Мансийский Автономный округ - Югра) (Dyukarev et al., 2021a; Kupriianova et al., 2022).

Наблюдения проводились на двух пунктах МУН1 и МУН2. Пункт наблюдений МУН1 расположен в типичном грядово-мочажинном комплексе в центральной части олиготрофного болота Мухрино. Второй пункт наблюдений (МУН2) – на расстоянии 630 м на северо-восток от первого в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе на том же болотном массиве

Измерения потоков углекислого газа, тепла и водяного пара проводились методом турбулентных пульсаций. Измерительные комплексы на основе ИК газоанализатора- CO₂, H₂O LI-7200 (Licor Biogeosciences, США) и ультразвукового анемометра uSonic-3 Sage MP (Metek, Германия) в 2022 г. были установлены на мачтах 7 и 10 м над поверхностью болота. В апреле 2023 измерительные комплексы были установлены на новых вышках на высотах 9.3 и 14 м. Метеорологические характеристики регистрировались автоматической метеостанцией (In Situ Instruments AB, Швеция) действующей в пункте МУН1 с 2010 г (Dyukarev et al., 2021b, 2023).

Данные наблюдений обрабатывались в программном обеспечении EddyPro (LI-COR Inc., USA) с применением стандартных поправок (Burba, 2013). В результатах пульсационных измерений присутствуют многочисленные пропуски, связанные как с перерывами в работе оборудования, так и с фильтрацией некорректных данных в условиях слабого турбулентного перемешивания. Для корректной оценки годовых сумм потоков, пропуски в данных были заполнены с помощью пакета REddyProc (Wutzler et al., 2018). В этом же пакете выполнена фильтрация данных по u* и разделение потоков на составляющие (GPP, ER).

Пульсационные измерения дают оценку суммарного поглощения углерода экосистемой. По данным измерений в пункте наблюдений МУН1, в апреле и начале мая, при отрицательных температурах воздуха, чистый экосистемный обмен положителен и варьирует в диапазоне от 0.05 до 0.4 мкмоль/м²/с (Рис.1). С наступлением весны и активизацией фотосинтеза появляется явно выраженный суточный ход, увеличивается эмиссия CO₂ в ночное время и одновременно возрастает поглощение в дневное. Так, в конце мая удельные потоки углекислого газа составляют + 2.8 ночью и -3.9 мкмоль/м²/с в дневное время. В течение лета с развитием растительности увеличивается поглощение CO₂, достигает -7.9 мкмоль/м²/с в первой декаде августа. Величина экосистемного дыхания в ночное время растет до +3.9 мкмоль/м²/с. В сентябре интенсивность обмена углекислого газа снижается, однако в отдельные дни продолжается активный сток CO₂, так 17 сентября 2023 был зарегистрирован поток интенсивностью -5.3 мкмоль/м²/с, что соответствует средней скорости поглощения в июле.

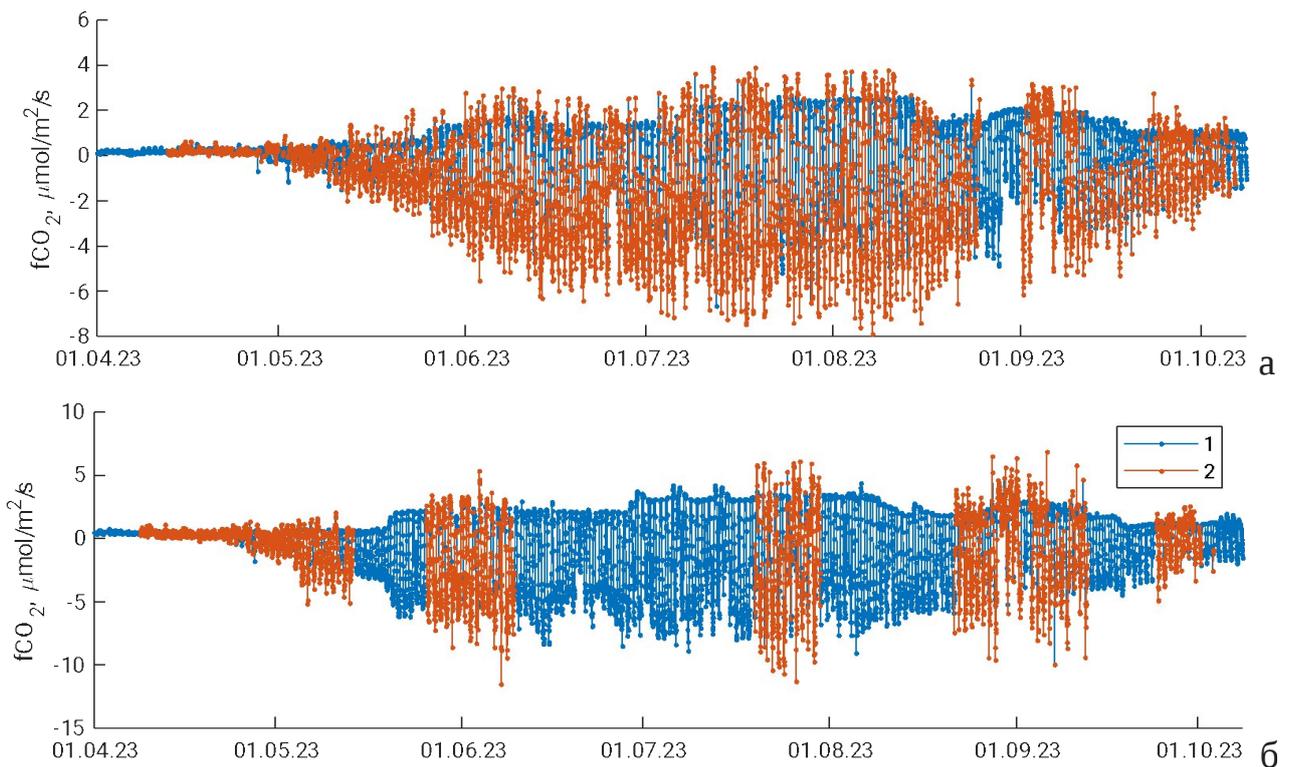


Рис. 1. Временной ход чистого экосистемного обмена в пунктах наблюдений МУН1 (а) и МУН2 (б) в 2023 г. 1 – восстановленные данные, 2 – результаты измерений.

По данным пульсационных измерений на станции Мухрино с апреля по сентябрь 2023 г на грядово-мочажинном комплексе (МУН1) составило 118.8 гС/м² (Рис. 2), а на сосново-кустарничково-сфагновом болоте (МУН2) поглощение было 151.5 гС/м². При этом с экосистемным дыханием в атмосферу выделилось 272.6 и 392.5 гС/м², а растительность в процессе фотосинтеза поглотила 392.3 и 544 гС/м² по данным измерений на МУН1 и МУН2, соответственно. Оба исследу-

емых болотных комплекса действовали как сток атмосферного углерода с мая по сентябрь, при этом наибольшее поглощение на станции МУН1 получено в июле (43.3 гС/м²), а на станции МУН2 – в июне (54,7 гС/м²). В 2022 г суммарное поглощение углерода за вегетационный период на грядово-мочажинном комплексе (МУН1) было оценено в 112.5 гС/м², а за год болото аккумулировало 82.8 гС/м².

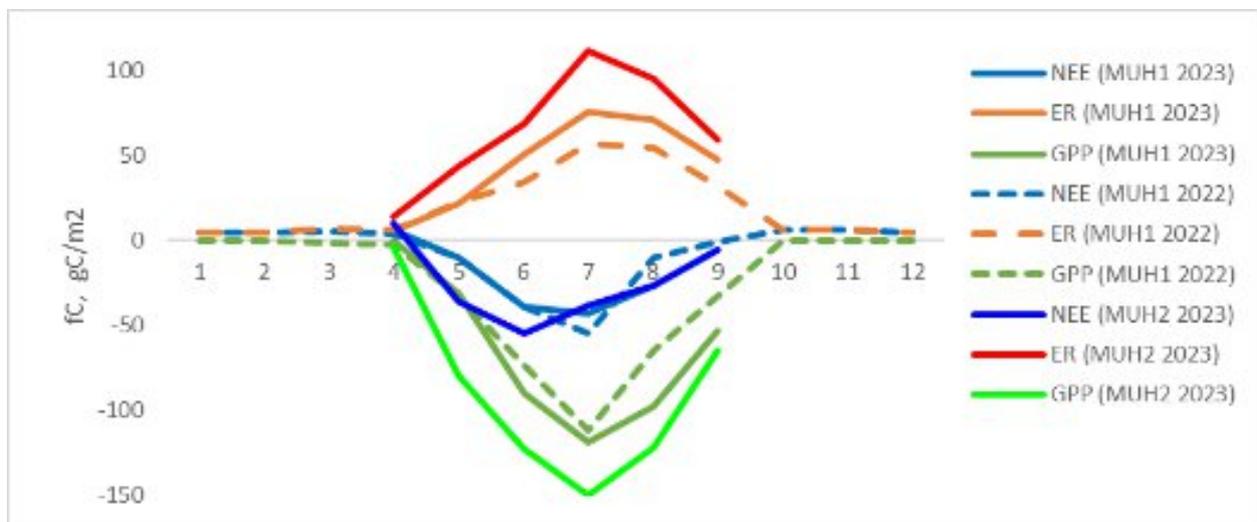


Рис. 2. Суммарные месячные потоки углерода на болоте Мухрино в 2022 и 2023 гг. по данным пульсационных измерений.

Результаты наблюдений аккумулированы в базы данных «Потоки углекислого газа, воды и энергии с поверхности грядово-мочажинного комплекса болота Мухрино, определенные методом турбулентных пульсаций» (свидетельства о регистрации баз данных №2023623489 от 17 октября 2023 г. и №2024621082 от 12 марта 2024 г.). Кроме потоков в БД содержится информация об основных метеорологических величинах (температура

и влажность воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление), характеристиках турбулентности и пр.

Таким образом, исследованные болотные экосистемы являются стоком для атмосферного углерода, а интенсивность этого стока в большей мере определяется характеристиками растительности и погодными условиями.

1. Burba G. 2013. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications. Lincoln: LI-COR Biosciences, 331 p.
2. Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Filippov I., Bleuten W., Khoroshavin V., Ganasevich G., Meshcheryakova A., Vesala T., Lapshina E. 2021a 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>.
3. Dyukarev E., Filippova N., Karpov D., Shnyrev N., Zarov E., Filippov I., Voropay N., Avilov V., Artamonov A., Lapshina E. 2021b. Hydrometeorological dataset of West Siberian boreal peatland: a 10-year record from the Mukhrino field station. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 2595–2605, <https://doi.org/10.5194/essd-13-2595-2021>.
4. Dyukarev E. 2023. Comparison of artificial neural network and regression models for filling temporal gaps of meteorological variables time series. *Appl. Sci. J.*, 13, 2646. <https://doi.org/10.3390/app13042646>
5. Kupriianova I.V., Kaverin A.A., Filippov I.V., Ilyasov D.V., Lapshina E.D., Logunova E.V., Kulyabin M.F. 2022. The main physical and geographical characteristics of the Mukhrino field station area and its surroundings *Env. Dynamics and Glob. Clim. Change*;13(4):215-252
6. Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J., Sickel K., Šigut L., Menzer O., Reichstein M. 2018. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosci.* 15, 5015–5030.

**ОЦЕНКА ПУЛОВ УГЛЕРОДА ПЕРВИЧНЫХ ЛЕСОВ
ДВИНО-МЕЗЕНСКОЙ ЛАНДШАФТНОЙ ПРОВИНЦИИ
НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

**ASSESSMENT OF CARBON POOLS OF PRIMARY FORESTS
OF THE DVINO-MEZEN LANDSCAPE PROVINCE IN THE NORTHEAST
OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA**

A. T. Zagidullina, N.V. Dinkelaker, N.V. Glushkovskaya, Yu.A. Pautov
A. T. Zagidullina, N.V. Dinkelaker, N.V. Glushkovskaya, Yu.A. Pautov

Институт географии РАН (г. Москва, Россия)
e-mail: asiya-z@yandex.ru

Преобладает представление, что старовозрастные леса углерод-нейтральны: при реализации углеродных проектов нередко предлагается их вырубка. При этом не учитывается, что первичные леса вносят непропорционально большой вклад в стабилизацию климата благодаря углероду, который они накапливают, а не высокой скорости его поглощения - они хранят значительно больше углерода, чем управляемые [1]. Необходимо переосмыслить роль этих лесов как резервуара углерода, сохранение которого в долгосрочной перспективе критически важно для контроля изменения климата [2]. Сведения о пулах углерода для первичных таежных лесов недостаточны - они ограничены таксационными данными (а на плохо доступных участках - табличными оценками), консервативные пулы С (детрит и почва) оцениваются лишь при специальных исследованиях, на малом количестве пробных площадей. В этой работе мы попытались дать оценку пулов углерода на основании данных наших полевых исследований и доступных таксационных сведений о первичных лесах Северо-Востока Европейской части России с учетом их сукцессионного состояния и лесорастительных условий. Были выполнены совместный анализ доступных данных лесоустройства, данных дистанционного зондирования, выявление пожаров, ветровалов, уточнение сведений о

лесном фонде, зонирование по лесорастительным условиям и проведен сбор дополнительных геопривязанных полевых данных, включая оценку запасов древостоя с учетом поколений и видов, крупных древесных остатков и почвенных прикопок. Всего в анализ включено около 400 пробных площадей (Архангельская обл. и респ. Коми). Для оценки углерода в фитомассе древостоя по таксационным данным и древесного детрита использовались конверсионные коэффициенты [3] и были разработаны специальные скрипты. Оценка массы углерода в древесных остатках была выполнена по методике Шороховой Е.В. с соавт. [4]. По результатам анализа наших экспериментальных данных с учетом материалов лесоустройства пул углерода первичных лесов составлен преимущественно углеродом почв и детрита, тогда как углерод растущего древостоя составляет меньшую долю. Наибольшие величины растущей фитомассы свойственны осиновым лесам 80-180 лет, произрастающих в черничных и кисличных группах типов леса. Наибольшие величины пула углерода крупных древесных остатков наблюдались в старовозрастных ельниках черничных с большой долей ветровалов. В среднем по массивам первичных лесов, пул углерода древесного детрита равенценен или выше запаса в растущей фитомассе древостоя.

1. Hudiburg, T. W., Law, B. E., Moomaw, W. R., Harmon, M. E. & Stenzel, J. E. Meeting GHG reduction targets requires accounting for all forest sector emissions. *Environmental Research Letters* 2019, 14, 095005.
2. Mackey, B. et al. Untangling the confusion around land carbon science and climate change mitigation policy. *Nature Climate Change* 2013 3, 552-557.
3. Schepaschenko, D.; Moltchanova, E.; Shvidenko, A.; Blyshchyk, V.; Dmitriev, E.; Martynenko, O.; See, L.; Kraxner, F. Improved Estimates of Biomass Expansion Factors for Russian Forests. *Forests* 2018, 9, 312.
4. Shorohova, E., Kapitsa. Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody debris in European boreal forests. // *For. Ecol. and Man.* 2014. Vol. 315. Pp. 173-184.

ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМНЫХ ПОТОКОВ CO₂ НА КРУПНОБУГРИСТОМ БОЛОТЕ КРАЙНЕ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

ASSESSMENT OF ECOSYSTEM CO₂ FLUXES ON A PALSA MIRE IN THE FAR NORTHERN TAIGA

С.В. Загурова, М.Н. Мигловец
S Zagirova, M.N. Miglovets

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия)
e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

В болотах северного полушария аккумулировано углерода 415 ± 150 Пг, примерно половина этого запаса приходится на болотные экосистемы криолитозоны (Hugelius et al., 2020). Согласно результатам многолетних наблюдений, «потепление» мерзлоты в разных географических точках циркумполярной зоны в последние десятилетия связано с увеличением летней температуры, продолжительности вегетационного периода, суммы зимних осадков и глубины снежного покрова (Smith et al., 2022), что в свою очередь приводит к изменению ландшафта, структуры растительного покрова и экосистемных функций мёрзлых болот. Оtepляющее влияние современного климата на структуру и состояние мерзлых почвогрунтов проявляется и на юге криолитозоны европейского северо-востока России (Каверин, Пастухов, 2018). Большинство авторов в своих исследованиях указывают, что круговорот углерода в болотных экосистемах контролируется, прежде всего, температурой и уровнем болотных вод. При этом существует большая неопределенность в прогнозной оценке изменения углеродного цикла с продолжающимся глобальным потеплением по причине недостаточного количества многолетних данных наземного мониторинга. Цель настоящей работы состояла в характеристике межгодовой вариабельности экосистемного обмена CO₂ и эмиссии CO₂ на разных элементах ландшафта одного из крупнобугристых болот в европейской части России.

Исследования проводили в Интинском районе Республики Коми (крайне северная тайга, 65°55' с.ш. 60°26' в.д.) в 2016 г. и 2017 г. Для крупнобугристого болота характерны грядово-мочажинный комплекс и мерзлотные торфяные бугры. В торфяных буграх сохраняется многолетняя мерзлота, глубина сезонно-талого слоя в летние месяцы достигает 80 см. Для оценки фитомассы в преобладающих типах болотных фитоценозов использовали метод монолитов. Измерения вертикальных потоков диоксида углерода выполне-

ны с 19 мая по 10 сентября 2016 и 2017 гг. методом микровихревых пульсаций (eddy covariance). Эмиссию CO₂ с поверхности микроландшафтов крупнобугристого бугра измеряли методом тёмных камер газоанализатором GGA-30p (Los Gatos Research, США). Метеоусловия при проведении наблюдений существенно различались между годами. В 2016 г. весна наступила рано, температура воздуха в мае-сентябре была выше среднего многолетнего значения, а сумма осадков в июне и августе превышала многолетнюю норму. В 2017 г. весна была более поздней, поэтому продолжительность периода активной вегетации (среднесуточная температура воздуха >10 °C) составила 109 дней, в то время как в 2016 г. она соответствовала 127 дням. В летние месяцы 2017 г. наблюдали недобор осадков, в июле сумма эвапотранспирации значительно превышала сумму выпавших осадков, в результате УБВ в мочажинах достигал -45 см, что на 10 см ниже, чем отмечено в 2016 г.

В растительном покрове на буграх преобладали лишайниковые и кустарничково-лишайниковые сообщества. Грядово-мочажинный комплекс занимал около 48 % площади, многолетняя мерзлота на этих участках не обнаружена (Мигловец и др, 2021). На грядах преобладали кустарничково-сфагновые, в понижениях – травяно-сфагновые сообщества растений. В соответствии с разным ботаническим составом, запас органического вещества живых растений и лишайников различался между элементами ландшафта (таблица 1), масса мхов выше на грядах, а сосудистых растений – на торфяном бугре. Сфагновые мхи доминировали в сообществах грядово-мочажинного комплекса, а на буграх замещались видами *Polytrichum strictum*, *Pleurozium schreberi*, р. Dicranum, однако их общее проективное покрытие не превышало 20 %. В кустарничково-лишайниковых сообществах на торфяных буграх доля лишайников в наземной массе составляла около 38 %.

Таблица 1. Запас органического вещества сосудистых растений, мхов и лишайников в исследованных сообществах крупнобугристого болота (г/м² абсолютно сухого веса)

Элемент рельефа, сообщество	Сосудистые растения	Мхи	Лишайники	Сумма
Мочажина, травяно-сфагновое	39/210*	391/629	-	1269
Гряды, кустарничково-морозково-сфагновое	262/686	370/992	-	2310
Бугор, кустарничково-лишайниковое	855/758	366/854	778/-	3611

Примечание: * – в числителе надземная, в знаменателе – подземная масса; «-» – фракция отсутствует

Сезонный ход эмиссии CO₂ с поверхности крупнобугристого болота соответствовал изменению температуры воздуха и почвы. В мае-июле 2016 г. суммарный поток CO₂ во всех микроландшафтах был выше, чем в 2017 г. (рисунок), что обусловлено более благоприятными погодными условиями. С поверхности травяно-сфагновых мочажин в приземный слой атмосферы поступало CO₂ в два-три раза меньше, чем кустарничково-сфагновых и кустарничково-лишайниковых сообществ, что соответствовало меньшему запасу живого растительного вещества.

Год	Сообщество	Месяц					
		V	VI	VII	VIII	IX	
2016	ТП	0.02	0.04	0.01	0.05	#Н/Д	
	ЛС	0.03	0.05	0.07	0.08	#Н/Д	
	КЛС	0.06	0.10	0.12	0.06	#Н/Д	
	ТСМ	0.02	0.05	0.08	0.03	#Н/Д	
	КМГ	0.05	0.10	0.15	0.06	#Н/Д	
2017	ТП	0.00	0.02	0.04	0.04	0.01	
	ЛС	0.01	0.03	0.05	0.07	0.02	
	КЛС	0.01	0.04	0.09	0.06	0.02	
	ТСМ	#Н/Д	0.00	0.04	0.06	0.02	
	КМГ	#Н/Д	0.04	0.11	0.10	0.03	

Рисунок. Сезонные изменения медианы скорости эмиссии CO₂ (мг м-2 сек-1) в мае-сентябре 2016 г. и 2017 г. в разных сообществах растений крупнобугристого болота: ТП – торфяное пятно, ЛС – лишайниковое на бугре, КЛС – кустарничково-лишайниковое на бугре, ТСМ – травяно-сфагновое в мочажине, КМГ – кустарничково-морозково-сфагновое на гряде. #Н/Д – нет данных.

По данным измерений нетто-обмена CO₂ (NEE) между крупнобугристым болотом и приземным слоем атмосферы методом микровихревых пульсаций, количество дней с нетто-поглощением в 2016 г. составило 93, а в 2017 г. – 74 дня. Так как весна в 2016 г. была более ранней, переход болотной экосистемы от источника к стоку CO₂ наблюдали уже в третьей декаде мая, а в 2017 г. – почти на месяц позже. В конце августа болото

становилось источником CO₂. Среднесуточное значение NEE за период наблюдений с 19 мая по 10 сентября достоверно не различалось между годами и соответствовало в 2016 г. –2,82±3,42 г CO₂ м⁻² сут⁻¹, а в 2017 г. –2,51±4,15 г CO₂ м⁻² сут⁻¹. При этом суммарные значения NEE, Reco и P_{gross} в 2016 г. оказались выше на 11-15%, чем в 2017 г., за счет более продолжительного периода вегетации (таблица 2).

Таблица 2. Сумма экосистемных потоков CO₂ (г CO₂ м⁻²) на крупнобугристом болоте крайне северной тайги с 19 мая по 10 сентября

Год	Нетто-обмен (NEE)	Экосистемное дыхание (Reco)	Горсс-фотосинтез (P _{gross})
2016	-325	1131	-1456
2017	-289	960	-1249

Отношение R_{eco}/P_{gross} в разные годы оставалось относительно постоянным и соответствовало 0,76-0,78.

Таким образом, на разных элементах рельефа крупнобугристого болота масса растений и лишайников составила 1,2-3,6 кг м⁻², сообщества с более высоким запасом живого органического вещества характеризовались повышенной эмиссией CO₂. Межгодовые различия эмиссии CO₂ в бесснежный период года могли быть обусловлены погодными условиями и УБВ, при дефиците осадков в 2017 г. наблюдали снижение эмиссионного потока. По данным измерений методом турбулентных пульсаций, суммарный экосистемный обмен CO₂ на крупнобугристом болоте определялся продолжительностью вегетационного периода. Кумулятивный NEE в 2016 г. и 2017 г. соответствовал -325 и -288 г CO₂ м⁻² (-88,6 и 78,5 г С м⁻²), что согласуется с результатам измерений нетто-обмена в сообществах европейских субарктических тундр (Marushchak et al., 2012).

1. Каверин Д.А., Пастухов А.В. 2018. Температурное состояние почвогрунтов бугристо-мочажинных болот в зоне редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород (Европейский Северо-Восток России) // Криосфера Земли. № 5. С. 47–56.
2. Мигловец М. Н., Загирова С. В., Гончарова Н. Н., Михайлов О. А. 2021. Эмиссия метана с крупнобугристого болота на северо-востоке европейской части России // Метеорология и гидрология. № 1. С. 93-102.
3. Hugelius G. A., Loisel J. A., Chadburn S. A., Jackson R.A., Jones M. A., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D. A., Packalen M., Siewert M. A, Treat C. A.-O., Turetsky M., Voigt C. A., Yu. Z. A. (2020). Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw // P. Natl. Acad. Sci. USA. 117. P. 20438–20446. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>.
4. Marushchak, M. E., Kiepe, I., Biasi, C., Elsakov, V., Friborg, T., Johansson, T., Soegaard, H., Virtanen, T., and Martikainen, P. J. 2013. Carbon dioxide balance of subarctic tundra from plot to regional scales // Biogeosciences. Vol. 10. P. 437–452. <https://doi.org/10.5194/bg-10-437-2013>.
5. Smith, S. L, O'Neill H. B., Isaksen K., Noetzli J., Romanovsky V. E. 2022. The changing thermal state of permafrost // Nature Reviews Earth Environment. Vol. 3. P. 10–23.

ВЕРХОВОЕ БОЛОТО «СТАРОСЕЛЬСКИЙ МОХ» КАК ОБЪЕКТ МНОГОЛЕТНИХ СТАЦИОНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАЗООБМЕНА CO₂ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РФ: ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

BOG «STAROSELKY MOKH» AS AN OBJECT OF LONG-TERM STATIONARY RESEARCH OF CO₂ EXCHANGE IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA: EXPERIENCE OF OBSERVATIONS ORGANISATION AND RESULTS

Д.Г. Иванов, Ю.А. Курбатова
D.G. Ivanov, J.A. Kurbatova

ФГБУН «Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова
Российской академии наук» (г. Москва, Россия)
E-mail: ivanovdg19@gmail.com

Верховое болото «Старосельский мох» является объектом многолетних комплексных исследований, направленных на оценку его структурно-функциональной организации. В настоящее время болото является полигоном для интенсивного изучения потоков парниковых газов и запасов углерода в рамках создания национальной сети мониторинга климатически активных веществ. Болото расположено в Тверской области, в охранной зоне Центрально-Лесного природного биосферного заповедника (56.4725° N, 33.0411° W), площадь болотного массива 617 га.

Болото является объектом ландшафтных, биологических, климатических и экологических исследований, начиная с середины XX века. Наиболее активные работы по его изучению начали проводиться с конца 80-х – начала 90-х годов коллективами под руководством М.С. Боч и Т.Ю. Минаевой (Боч, Минаева, 1991), Ю.Г. Пузаченко (Сандлерский и др., 2016). Основные работы были направлены на изучение структуры растительности, морфологии болота, мощности торфяной залежи, спорово-пыльцевого состава торфяных отложений, гидрологии болота, а также на создание системы многолетнего мониторинга уровня болота и прироста сфагноума.

Эколого-функциональные исследования, связанные с потоками парниковых газов между болотом и атмосферой, были начаты в конце 90-х годов с проведения наблюдений за экосистемными потоками тепла, влаги и CO₂ с использованием эколого-климатической станции, установленной на грядово-мочажинном комплексе (ГМК) болота в рамках реализации международного проекта EuroSiberian Carbonflux. Исследования были выполнены в период 1998-2000 гг., после окончания проекта станция была демонтирована.

Мониторинговые исследования потоков парниковых газов на уровне микроландшафта камерным методом на постоянной основе начались с 2013 г. (Ivanov et al., 2017), и с 2015 г. были возобновлены наблюдения за экосистемными потоками диоксида углерода.

Измерения эмиссии CO₂ между напочвенным покровом и атмосферой с использованием закрытых статических камер и высокоточных инфракрасных газоанализаторов проводятся в основных экосистемах верхового болота: на грядово-мочажинном комплексе, а также в высоком сосняке багульниково-сфагновом и в низком сосняке очеретниково-сфагновом. Всего с 2013 по 2023 г. было осуществлено 11 циклов летних измерений (за исключением 2020 г.) с частотой 2-4 раза в месяц, а также отдельные осенние и весенние измерения в различные годы (всего более 5100 измерений, включая повторности). В периоды 2015-2017 гг. и 2023-2024 гг. были проведены ежемесячные измерения, в том числе и в холодное время года для оценки годовой динамики и расчетов суммарной эмиссии CO₂. В 2021-2022 гг. для расширения анализа пространственной неоднородности эмиссии CO₂ были проведены наблюдения на дополнительных типах микроформ и комплексах растительных ассоциаций (мезотрофные участки болота, заболоченные еловые крайки, участки с сухостоем, топи), а также потоки из живой и мертвой древесины ели и сосны. В период 2014-2017 гг. параллельно с регистрацией эмиссии темновой камерой, измерялся баланс CO₂ прозрачной камерой, а с 2021 г. начали проводиться наблюдения за эмиссией CH₄ с использованием газоанализатора Li-7810 (Li-Cor Inc., США).

Все измерения организованы рядом с деревянными настилами или площадками для

предотвращения случайного «выдавливания» парниковых газов из торфа, что особенно важно при высокоточных измерениях потоков метана. Пластиковые основания диаметром 20-30 см устанавливались на глубину около 15 см для предотвращения поступления латеральных потоков в камеру через торф с высокой пористостью. Растительность внутри оснований не удалялась. Количество повторностей для каждой экосистемы или микроформы составляло от 5 до 10. Параллельно измерялись температуры почвы на глубине 10 см и воздуха внутри и снаружи камеры и уровень болотных вод в перфорированных трубках. Весной 2024 г. установлены автоматические камеры для непрерывного измерения потоков CO_2 с напочвенного покрова.

Измерения экосистемных потоков CO_2 , CH_4 в настоящее время осуществляются на основе метода турбулентных пульсаций с помощью оборудования эколого-климатической станции, высотой 2.5 м, оснащенной стандартным комплектом приборов для регистрации концентрации CO_2 , CH_4 в атмосфере, а также скорости и направления ветра (ультразвуковой анемометр). Комплект метеорологического оборудования используется для измерения температур почвы и воздуха, приходящей и отраженной солнечной радиации, уровня болотных вод, потоков тепла в почве и количества атмосферных осадков. Энергоснабжение станции осуществляется с помощью солнечной и ветровой энергии.

В 2019-2022 на болоте активно проводилась высокодетальная аэрофотосъемка с

использованием БПЛА. Для интерполяции точечных данных измерений на крупные комплексы растительных ассоциаций были сняты ортофотопланы всего болота и различных его частей. Сезонный ряд ортофотопланов грядово-мочажинного комплекса позволил построить зависимость площади обводненных микроформ от уровня болотных вод и провести оценки площадей каждого типа микроформ (Ivanov et al., 2021). В летние сезоны 2020-2021 г. совместно с Т.Ю. Минаевой (<https://www.researchgate.net/profile/Tatiana-Minayeva>) и О.В. Чередниченко (<https://istina.msu.ru/workers/426879/all/?ysclid=lvpxvofd3861477265>) было проведено картографирование структуры растительного покрова всего верхового болота и оценка доли микроформ для каждой растительной ассоциации, что позволило рассчитать интегральные значения эмиссии CO_2 и CH_4 для каждого комплекса и всей южной части болотного массива (Минаева и др., 2020). В дальнейшем планируется сделать оценку эмиссии парниковых газов с напочвенного покрова для всего болота в целом. Кроме того, проведена оценка структуры микроформ и вклад каждого их типа в экосистемные потоки CO_2 в пределах площади осреднения потоков эколого-климатической станции.

В докладе планируется представить основные результаты экспериментальных работ по оценке временной и пространственной динамики потоков парниковых газов на болоте «Старосельский мох» в условиях современного климата.

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). Отдельно стоит отметить неоценимый вклад сотрудников Центрально-Лесного биосферного заповедника в изучение эколого-климатических процессов верхового болота и в организации многолетнего, с 1992 г., мониторинга уровня болотных вод.

1. Боч, М. С. Болота Центрально-лесного заповедника / М. С. Боч, Т. Ю. Минаева // Болота охраняемых территорий. под ред. Боч М. С.: Тез. докл. XI семинара-экскурсии по болотоведению. Ленинград. – 1991. – С. 22-26.
2. Выбор единиц картографирования для целей долговременного мониторинга экосистемных функций верховых болот / Т. Ю. Минаева, Д. Г. Иванов, О. В. Чередниченко, Е. А. Шуйская // Растительность Восточной Европы и Северной Азии. – 2020. – С. 39-39.
3. Долговременные измерения параметров функционирования верхового болота Старосельский мох / Р. Б. Сандлерский, М. Ю. Пузаченко, И. И. Широная и др. // Стационарные экологические исследования: опыт, цели, методология, проблемы организации. – 2016. – С. 1
4. Estimation of carbon dioxide fluxes on a ridge-hollow bog complex using a high resolution orthophotoplan / D. G. Ivanov, I. Kotlov, T. Y. Minaeva, J. Kurbatova // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2021. – Т. 6. – № 2. – С. 16-28.
5. Ivanov, D. G. CO_2 fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer / D. G. Ivanov, V. K. Avilov, Y. A. Kurbatova // Contemporary Problems of Ecology. – 2017. – Т. 10. – С. 97-104.
6. Modeling of the carbon dioxide fluxes in European Russia peat bogs / J. Kurbatova, C. Li, F. Tatarinov и др. // Environmental Research Letters. – 2009. – Т. 4. – № 4. – С. 045022.

ПОТОКИ УГЛЕРОДА В ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ МЕКСИКИ

CARBON FLUXES IN WET ECOSYSTEMS OF CENTRAL MEXICO

*Е. Н. Икконен¹, Н. Е. Гарсиа-Кальдерон², Э. Фуентес-Ромеро², А. Ибаньес-Хуэрта²
E. N. Ikkonen¹, N. E. García-Calderón², E. Fuentes-Romero², A. Ibáñez-Huerta²*

¹ Институт биологии – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск, Россия)

² Национальный автономный университет Мексики (г. Мехико, Мексика)

e-mail: likkonen@gmail.com

Исследована динамика и интенсивность темновых потоков CO_2 и CH_4 в переувлажненных травянистых экосистемах Центральной Мексики. Измерения выполняли раз в две недели методом темновых камер с последовательным определением концентрации газов в воздушном пространстве камер. Исследование проводили с июля 2008 г по август 2009 г. Изучали три вида темнового потока газов: 1. экосистемный поток, включающий дыхание растительного покрова и эмиссии газа из почвы (R_{ecos}); 2. дыхание почвы, включающее автотрофное и гетеротрофное дыхание (R_{soil}); 3. гетеротрофное дыхание (R_{het}). Также исследовали динамику накопления растительным покровом биомассы, динамику массы опада, температурный и влажностный режим почвы и динамику содержания CO_2 в почвенном воздухе. В среднем для шести исследованных участков годовые потери углерода экосистемами составили $390 \text{ гC-CO}_2/(\text{м}^2 \text{ г})$, дыхание почвы и гетеротрофное дыхание достигали соответственно 172 и $101 \text{ гC-CO}_2/(\text{м}^2 \text{ г})$. Потоки CH_4 были зафиксированы только на участке с самым высоким уровнем стояния грунтовых вод, доходящим до поверхности почвы. Транспорт CH_4 из почвы в атмосферу осуществлялся в основном по тканям аэренхимы растений в период максимального накопления растительным покровом биомассы. За данный период поток метана из экосистемы составлял в среднем $15 \pm 8 \text{ мкгC-CH}_4/(\text{м}^2 \text{ ч})$ с максимумом, близким к $400 \text{ мкгC-CH}_4/(\text{м}^2 \text{ ч})$. Содержание CO_2 в почвенном воздухе было строго дифференцировано по слоям почвы с повышением концентрации газа до значений, превышающих 10000 pppt, на глубине 50 см. Как концентрация CO_2 в воздухе почвы, так и потоки CO_2 проявили межсезонную вариабельность с понижением значений в холодный период с октября по февраль и с повышением интенсивности продуцирования и транспорта газа в теплый сезон с марта по сентябрь. Выявлены определенные различия в интенсивности

потоков CO_2 между исследованными участками, однако в среднем они были существенно ниже таковых, определенных для большинства травянистых экосистем и почв различных климатических зон. Низкие значения R_{ecos} , R_{soil} и R_{het} на исследованных участках можно объяснить высоким уровнем содержания солей в почвах центральной Мексики, что связано с высокой вулканической активностью на данной территории и выделением ионов натрия при выветривании вулканического пепла. Кроме того, часть почв исследованного района была засолена вследствие орошения сельскохозяйственных земель сточными водами, поступающими из города Мехико. Ингибирование активности почвенного микробного комплекса и лимитирование заселения территории высшими растениями на почвах с высоким уровнем защелачивания ограничивает продуцирование в них газов и обуславливает низкую интенсивность потерь экосистемами углерода.

Даже при низкой интенсивности потоков CO_2 из почв и экосистем исследованного района они демонстрировали пространственную и временную вариабельность. Пространственная изменчивость содержания и эмиссии CO_2 была обусловлена в основном различиями в растительном покрове и его продуктивности, а также различиями в температурном и влажностном режимах почв. Сезонность динамики потоков углекислого газа определяли в основном температурозависимое изменение растительной фитомассы и температура почвы. Влияние влажности почвы на сезонные изменения скорости потока CO_2 было менее выражено.

Вклад R_{soil} в R_{ecos} составлял в среднем для всех участков за весь период измерений 41%, а вклад R_{het} в R_{soil} достигал 52%. Сезонная динамика вкладов была выявлена только для участков, на которых происходила смена растительного состава, обусловленная в основном межсезонными изменениями водного режима почвы.

Таким образом, темновые потоки углерода из экосистем и почв переувлажненных территорий центральной Мексики характеризуются низкой интенсивностью, что связано с высоким уровнем щелочности почвы и низкой продуктивностью экосистем. Пространственная изменчивость тем-

новых потоков CO_2 обусловлена в основном различиями растительного покрова и уровня увлажнения почвы, а временную динамику определяет сезонность температурного режима и межсезонная вариабильность накопления покровом фитомассы.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОТОКА УГЛЕРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ

LONG-TERM AUTOMATED MONITORING OF CARBON FLUX FROM THE BOG SURFACE

А.А. Кулик^{1*}, Е.А. Заров¹, А.А. Дмитриченко¹, Е.А. Дюкарев^{1,2}
А.А. Kulik^{1*}, Е.А. Zarov¹, А.А. Dmitrichenko¹, Е.А. Dyukarev^{1,2}

¹ Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)
e-mail: K.ARTEM.A@yandex.ru

Введение. Современные глобальные климатические изменения являются одним из наиболее важных и значимых явлений на планете, которые требуют углубленного изучения и анализа. Одной из ключевых причин изменений климата является увеличение содержания парниковых газов (ПГ) в атмосфере, в том числе вследствие антропогенной активности, что приводит к усилению парникового эффекта (IPCC, 2023).

Болотные экосистемы играют значимую роль в круговороте углерода (С) планеты. В естественном ненарушенном состоянии они являются низкопродуктивным поглотителем С, где углерод депонируется в виде торфа (Zemtsov et al., 1998; Strack, 2008). Гидрометеорологические факторы оказывают наибольшее влияние на интенсивность потоков ПГ в болотных экосистемах (Kulik, Zarov, 2023). Так, климатом обусловлена интенсивность накопления С, а гидрологический режим определяет условия разложения органики.

Объекты и методы. Исследование выполнено на территории международной полевой станции “Мухрино”, расположенной в центральной части Западной Сибири (Dyukarev et al., 2021a). Климат района исследования отличается высокой повторяемостью антициклональных условий, быстрым изменением погодных условий, влажным, умеренно теплым летом и довольно суровой, снежной зимой (Kupriianova et al., 2022). Данная работа сосредоточена на изучении чистого экосистемного обмена (NEE) мочажинного участка олиготрофного верхового болота Мухрино. В травяном ярусе мочажины преобладали шейхцерия (*Scheuchzeria palustris*), осока (*Carex limosa*), несколько видов пушицы (*Eriophorum russeolum*, *E. vaginatum*) и росянка (*Drosera rotundifolia*, *D. anglica*). В моховом покрове доминировали гидрофильные виды

сфагновых мхов (*Sphagnum balticum*, *Sph. majus*, *Sph. jensenii*).

Измерение удельного потока CO₂ выполнено автоматизированным камерным методом. В летний сезон 2021-2022 гг. была использована камерная система LI-8100A (LI-COR, США, г. Линкольн), включающая в себя газоанализатор LI-8100A, мультиплексор LI-8150A, а также автоматизированные камеры прозрачного типа (LI-COR 8100-104с), измеряющие чистый экосистемный обмен (NEE). В 2023 г. измерения проводились камерной системой KACM-8 (камерная автоматическая система мониторинга ПГ, ИМКЭС СО РАН, Россия, г. Томск). Система включала в себя газоанализатор LI-850 (LI-COR, США, г. Линкольн) CO₂ и H₂O, встроенный мультиплексор и автоматизированные камеры прозрачного типа, оснащенные датчиком температуры в камере. Время экспозиции было выбрано в зависимости от интенсивности потока и конструкции камеры, для 2021-2022 гг. оно составило 2:30 мин, для 2023 г. – 3:00 мин. Площадь оснований составляла 317.8 см², для 2021-2022 гг., для 2023 г. – 2 500 см². Объем камер в 2021, 2022 гг. составлял 3876 см³ и 125 000 см³ в 2023 году.

Для расчета удельных потоков CO₂, полученных системой LI-8100A использовалась линейная модель специального программного обеспечения LI-8100 File Viewer (LI-COR, США, г. Линкольн). Расчет потоков CO₂ для KACM-8 был выполнен по формуле (1), вычисления производились с помощью языка программирования R с использованием пакетов dplyr (Wickham et al., 2023), ggplot2 (Wickham, 2016), zoo (Zeileis, Grothendieck, 2005), cowplot (Wilke, 2019). В дальнейшем вышеперечисленные пакеты были использованы для обработки и визуализации данных с LI-8100A и KACM-8.

$$F_c = \frac{10VP_0 \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right) \frac{\partial C'}{\partial t}}{RS(T_0 + 273.15)} \quad (1)$$

где F_c - скорость выделение CO_2 с поверхности экосистемы ($\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$), V - объем (см^3), P_0 - начальное давление (кПа), W_0 - начальная мольная доля водяного пара (ммоль моль^{-1}), R - универсальная газовая постоянная, S - площадь поверхности почвы (см^2), T_0 - начальная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и $\frac{\partial C'}{\partial t}$ - начальная скорость изменения мольной доли CO_2 с поправкой на воду (мкмоль моль^{-1}).

Для исключения из расчёта потока CO_2 колебаний концентраций газа, связанных с закрытием камеры, исключались первые 30 сек (LI-COR 8100A) и первые 40 сек (KACM-8). Восстановление пропусков в измерениях было выполнено с помощью онлайн-инструмента REddyProcWeb (Wutzler et al., 2018).

Метеорологические характеристики были получены с помощью автоматической метеостанции, расположенной на мочажинном участке болота (Dyukarev et al., 2021b).

Результаты. Для анализа взяты метеорологические характеристики за три года наблюдений (2021-2023 гг.) с 1 июля по 31 июля. Средняя суточная температура воздуха (T_{air} , рис.1A) за данный период варьировалась от 9 до 28 $^{\circ}\text{C}$ (2021 г.), от 11 до 25 $^{\circ}\text{C}$ (2022 г.), от 14 до 26 $^{\circ}\text{C}$ (2023 г.), средняя T_{air} (рис.1A) за месяц составля-

ла 16 $^{\circ}\text{C}$ (2021 г.), 18 $^{\circ}\text{C}$ (2022 г.), 19 $^{\circ}\text{C}$ (2023 г.). Вариабельность усредненных за сутки данных фотосинтетически активной радиации (PAR, рис.1B) в июле составляла от 116 до 525 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (2021 г.), от 161 до 524 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (2022 г.), от 87 до 416 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (2023 г.), средняя PAR (рис.1B) за месяц составляла 329 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (2021 г.), 398 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (2022 г.), 257 $\text{мкмоль м}^{-2}\text{с}^{-1}$ (2023 г.). Средняя суточная относительная влажность воздуха (RH, рис.1C) в июле колебалась от 60 до 92% (2021 г.), от 62 до 88% (2022 г.), от 53 до 98% (2023 г.). Средняя температура воздуха (рис.1C) за месяц составляла 76% (2021 г.), 75% (2022 г.), 84% (2023 г.). Средний суточный уровень болотных вод (WL, рис.1D), положительные значения – УБВ ниже поверхности болота, отрицательные значения – УБВ выше уровня болота) в исследуемый период варьировал от 5.71 до 12.13 см (2021 г.), от -6.85 до 8.60 см (2022 г.), от 6.49 до 12.96 см (2023 г.). Средний УБВ за месяц составил 9.54 см (2021 г.), 0.96 см (2022 г.), 9.91 см (2023 г.).

В суточном ходе, выделение C в атмосферу фиксируются в темное время суток (20:00-04:00) и представляют общее дыхание экосистемы. Поглощение CO_2 происходило с раннего утра (05:00) до позднего вечера (19:00), интенсивная ассимиляция CO_2 связана с процессом фотосинтеза растений. Эмиссия C в среднем суточном потоке NEE превалировала над ассимиляцией: 2 июля (2021 г.), 4 июля (2021 г.), 3 июля (2022 г.).

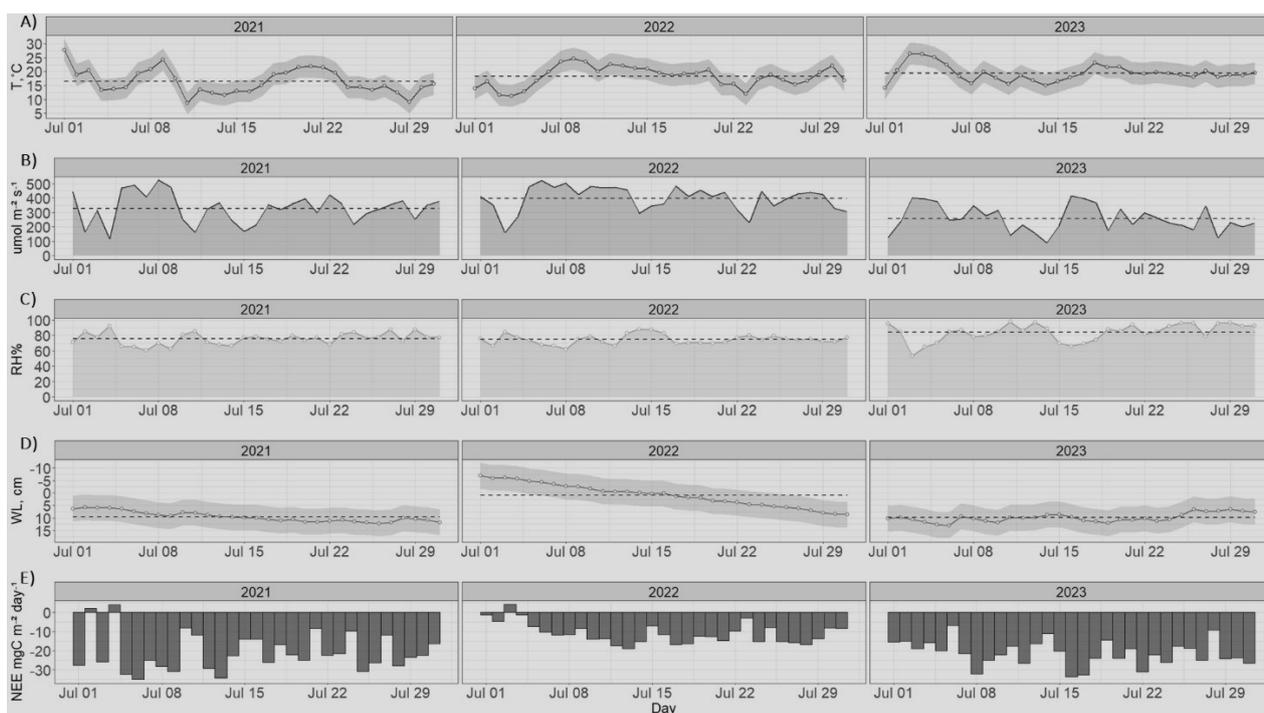


Рис.1. Средние суточные гидрометеорологические характеристики и NEE на мочажинном участке болота Мухрино в 2021-2023 годах. А – температура воздуха, В - фотосинтетически активная радиация, С - относительная влажность воздуха, D - NEE. Пунктирной линией показаны усредненные значения за месяц.

Остальные дни доминировало поглощение углерода из атмосферы. Максимальное значение ассимиляции среднего суточного NEE (рис.1Е): $-35.12 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2021 г.), $-19.01 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2022 г.), $-33.81 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2023 г.). Максимальное значение выделения С в NEE (рис.1Е): $3.77 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2021 г.), $4.11 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$

(2022 г.). Среднее значение потока NEE за июль: $-20.85 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2021 г.), $-10.98 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2022 г.), $-21.28 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2023 г.). Кумулятивный поток NEE (рис.2) с 1-31 июля составил: -15.51 гС м^{-2} (2021 г.), -8.17 гС м^{-2} (2021 г.), -15.83 гС м^{-2} (2023 г.).

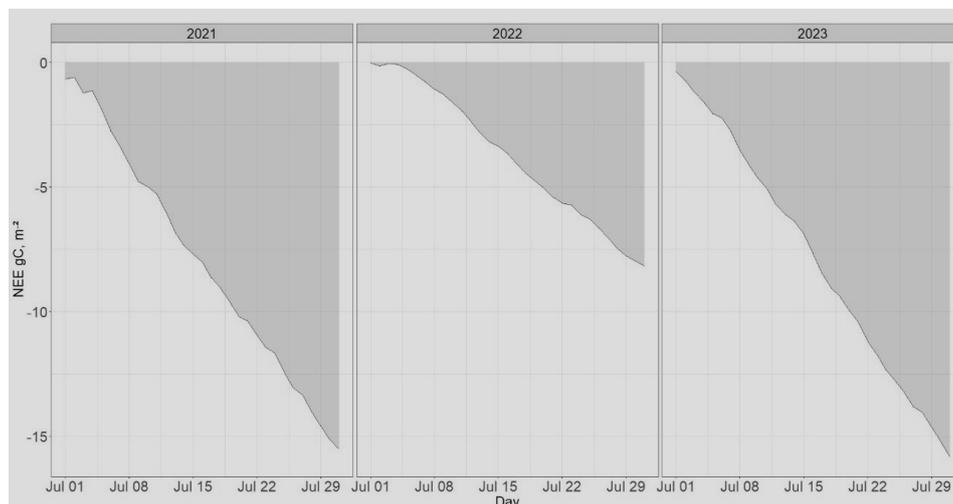


Рис.2. Кумулятивный NEE мочажинного участка болота Мухрино в июле 2021-2023 года.

Обсуждение. За 2021-2023 гг. в июле доминировал процесс аккумуляции углерода, и мочажина выступала поглотителем С, данный факт соотносится с результатом других исследований (Dyukarev et al, 2019; Zarov et al., 2022; Kulik, Zarov, 2023). В 2022 г. зафиксировано наименьшее значение NEE, средний суточный NEE за июль 2022 г. составил $-10.98 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$, а кумулятивный NEE -8.17 гС м^{-2} . NEE мочажины в 2022 г. отличается от NEE 2021 и 2023 г. в ~ 2 раза. Предположительно, такое отличие NEE связано с высоким УБВ. Уровень болотных вод в июле 2022 г. вплоть до 14.07.2022 г. находился выше поверхности исследуемой мочажины.

Заключение. Анализ потоков чистого экосистемного обмена (NEE) углерода (С) показал, что в течение исследуемого периода (2021-2023 гг.), в июле мочажинный участок болота

“Мухрино” действовал как поглотитель С. Обнаружено, что мочажина выступала как источник углерода всего 3 дня за исследуемый период; при этом остаток месяцев в экосистеме доминировало поглощение С (90 дней). Зафиксировано, что максимальное значение ассимиляции среднего суточного NEE $-35.12 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2021 г.), $-19.01 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2022 г.), $-33.81 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2023 г.). Максимальное значение выделения С в NEE $3.77 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2021 г.), $4.11 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$ (2022 г.). Наибольшее среднее значение NEE за месяц было в 2023 году ($-21.28 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$), наименьшее в 2022 году ($-10.98 \text{ мгС м}^{-2} \text{ сутки}^{-1}$). Наибольшая аккумуляция углерода за исследуемый период зафиксирован в 2023 г. (-15.83 гС м^{-2}), наименьшая в 2021 г. (-8.17 гС м^{-2}). Предполагается, что отличие NEE в 2022 году связано с высоким уровнем болотных вод.

1. Земцов, А. А., Мезенцев, А. В., и Инишева, Л. И. 1998. Болота Западной Сибири: их роль в биосфере. Томск: ТГУ, СибНИИТ. 72 с.
2. Dyukarev E., Filippova N., Karpov D., Shnyrev N., Zarov E., Filippov I., Voropay N., Avilov V., Artamonov A., Lapshina E. 2021b. Hydrometeorological dataset of West Siberian boreal peatland: a 10-year record from the Mukhrino fieldstation. *Earth System Science Data*, 13(6): 2595-2605. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2595-2021>
3. Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Filippov I., Bleuten W., Khoroshavin V., Ganasevich G., Meshcheryakova A., Vesala T., Lapshina E. 2021a. 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>
4. Dyukarev E.A., Godovnikov E.A., Karpov D.V., Kurakov S.A., Lapshina E.D., Filippov I.V., Filippova N.V., Zarov E.A. 2019. Net Ecosystem Exchange, Gross Primary Production And Ecosystem Respiration In Ridge-Hollow Complex At Mukhrino Bog. *Geography, Environment, Sustainability*, 12(2): 227-244. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-77>

5. IPCC. (eds. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero). 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
6. Kulik A.A., Zarov E.A. The influence of the hydrometeorological factors on the CO₂ fluxes from the oligotrophic bog surface. // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. - 2023. - T. 14. - №4. - C. 249-263. doi: 10.18822/edgcc624160
7. Kupriianova I.V., Kaverin A.A., Filippov I.V., Ilyasov D.V., Lapshina E.D., Logunova E.V., Kulyabin M.F. 2022. The main physical and geographical characteristics of the Mukhrino field station area and its surroundings. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(4): 215-252. doi: 10.18822/edgcc240049
8. Strack M. (ed.). *Peatlands and climate change*. – IPS, International Peat Society, 2008.
9. Wickham H. 2016. Data Analysis. In: *ggplot2. Use R!* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_9
10. Wickham H., Francois R., Henry L., Miller K., Vaughan D. 2023. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.4, <https://github.com/tidyverse/dplyr>, <https://dplyr.tidyverse.org>
11. Wilke C. O., Wickham H., Wilke M. C. O. Package 'cowplot' //Streamlined plot theme and plot annotations for 'ggplot2'. – 2019. – T. 1.
12. Wutzler T, Lucas-Moffat A, Migliavacca M, Knauer J, Sickel K, Sigut, Menzer O & Reichstein M (2018) Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, Copernicus, 15, doi: 10.5194/bg-15-5015-2018
13. Zarov E.A., Jacotot A., Kulik A.A., Gogo S.S., Lapshina E.D., Dyukarev E.A. 2022. The carbon dioxide fluxes at the open-top chambers experiment on the ombrotrophic bog (Mukhrino field station). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(4): 194-201. doi: 10.18822/edgcc168830
14. Zeileis A., Grothendieck G. zoo: S3 infrastructure for regular and irregular time series //arXiv preprint math/0505527. – 2005.

ЗАБОЛОЧЕННЫЕ ЛЕСА ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ КАК ИСТОЧНИКИ МЕТАНА

SOUTH TAIGA SWAMP FORESTS OF EUROPEAN RUSSIA AS METHANE SOURCES

*С.Ю. Моченов¹, Д.В. Ильясов², Г.Г.Суворов^{1, 3}, М.С.Мишина^{1, 4},
Р.А.Руньков^{2, 4}, М.В. Глаголев^{2, 3, 4}
S.Yu. Mochenov¹, D.V. Ilyasov², G.G. Suvorov^{1, 3}, M.S. Mishina M.S.^{1, 4},
R.A. Runkov^{2, 4}, M.V. Glagolev^{2, 3, 4}*

¹ Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН (г. Москва, Россия)

² Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

³ Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Россия)

⁴ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

E-mail: mochenov.semen@gmail.com

Введение. Метан (CH₄) – один из основных парниковых газов (ПГ) (Canadell et al, 2021). Лесные экосистемы традиционно считаются стоком CH₄ из атмосферы за счёт деятельности метанотрофных бактерий, обитающих в верхних слоях почвы (Ueyama et al., 2015, Sabrekov et al., 2021). Однако при определенном увлажнении лесные почвы могут стать источниками метана: в анаэробных условиях (при заполнении порового пространства влагой) и наличии необходимого количества доступного органического вещества может начаться метаногенез (Megonigal and Guenther, 2008), достаточный для эмиссии CH₄ в атмосферу. Эмиссия CH₄ наблюдается как в постоянно заболоченных лесах (Davidson et al., 2019; Glukhova et al., 2022), так и в лесах с периодическим переувлажнением (Lohila A. et al., 2016, Глаголев и др., 2017). В заболоченных лесах эмиссия CH₄ возможна не только из почвы, но и через растения, в том числе через деревья и их стволы (Barba et al., 2019).

В данной работе термин «заболоченные леса» (ЗЛ) используется для обозначения лесных экосистем с органогенным слоем почвы менее 40 см и влажностью почвы выше полевой влагёмкости или с органогенным слоем почвы более 40 см и высотой деревьев более 10 м – аналогично англоязычному «swamps», использованному в (Elmes et al., 2021).

Проблема недоучёта эмиссии CH₄ заболоченными лесами, величина которой, вероятно, меньше относительно болотных экосистем (Терентьева и др., 2017), заключается в том, что подобные источники потенциально могут занимать большие площади. При этом в простейших моделях инвентаризации потоков ПГ с использованием данных дистанционного зондирования

Земли (ДЗЗ) все лесные участки рассматриваются как стоки CH₄. На территории Западной Сибири в подобных экосистемах проводились исследования эмиссии CH₄ как из почвы (Glagolev et al., 2018; Mochenov et al., 2018), так и со стволов деревьев (Churkina et al., 2018). Хотя число работ об эмиссии CH₄ в заболоченных лесах растёт, они обычно основаны на разовых измерениях (Runkov and Ilyasov, 2023). Для оценки вклада заболоченных лесов в цикл CH₄ необходимы исследования: а) с большим территориальным охватом (и диапазоном экологических условий); б) с большим количеством прямых измерений потока (регулярные, с учётом временной изменчивости); в) направленные на пространственную инвентаризацию распространения ЗЛ на основе данных ДЗЗ; г) включающие оценку эмиссии CH₄ из деревьев – с учетом площадей их функциональных поверхностей (стволов, листьев, хвои и т.д.).

Цель данного исследования – оценка потоков CH₄ из почв и стволов деревьев на различных участках заболоченных лесов южной тайги Европейской части России.

Материалы и методы. Исследования проводились в трех заболоченных лесных массивах: один на территории Центрально-лесного государственного природного биосферного заповедника в Тверской обл. (точки Т1, Т3, Т5, Т6, Т8, Т10); два в Рузском р-не Московской обл. – в районе населенных пунктов Новониколаевка (Ber1, Che1, Che2, Che3, S1) и Дорохово (Sw1, Sw2, Sw3, Sw4, Sw5, Sw6, Sw7, For2). На участках Т1, Т3, Т5, Т6, Т10 в древесном ярусе преобладает *Picea abies* (L.) H.Karst. с примесью *Betula pubescens* Ehrh., мощность торфа на этих участках составляет 70, 40, 25, 33, 90 см соответственно. Древесная растительность на участке Т8 представлена *Pinus*

silvestris L. и *Betula pubescens* Ehrh., мощность торфа - 90 см. Участки Sw1, Sw2, Sw3, Sw4, Sw5, Sw6, Sw7 представлены смешанным лесом (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Betula pubescens* Ehrh., *Picea abies* (L.) H.Karst, *Quercus robur* L., *Populus tremula* L.); органогенный горизонт почвы представлен перегнойно-темногумусовым мощностью около 20 см. Участки Che1, Che2, Che3 представлены черноольховым лесом, участок S1 - сосновым лесом, участок Ber1 - берёзовым лесом. Исследования на участках T1, T3, T5, T6, T8, T10 проводились в июне-октябре 2022 г. и мае-октябре 2023 г, на остальных участках – в июне и августе 2022 г.

Удельные потоки (УП) CH₄ измерялись методом статических камер с использованием

газоанализатора Li-7810 («LI-COR», США). На участках T1, T3, T5, T6, T8, T10 для почвы использовались камеры круглого сечения объёмом 4.8 л и площадью основания 283 см², на остальных – квадратного сечения объёмом 49.2 л и площадью основания 1600 см². Для измерения потока из стволов деревьев использовалась т.н. «полужёсткая» камера (Siegenthaler *et al.*, 2016): площадь основания – 162 см², объём – 1.4 л. Время экспозиции во всех случаях не превышало 3 минуты. Расчёт потока проводился по модели линейной регрессии в координатах «время-концентрация» с пересчётом концентрации в массу газа по уравнению Менделеева-Клайперона. Уровень почвенно-грунтовых вод (УПГВ) был измерен с помощью предварительно пробуренных скважин.

Таблица 1. Потоки CH₄ из почвы и значения УПГВ на исследуемых участках заболоченных лесов.

Точка	Поток CH ₄ , мгCH ₄ м-2 ч-1 *					n	УПГВ, см **		
	мин.	q1	медиана	q3	макс.		медиана	мин.	макс.
T1	-0.111	-0.038	-0.019	-0.011	0.068	64	41	28	95
T3	-0.089	-0.016	-0.008	-0.003	0.012	64	23	12	51
T5	-0.250	-0.037	-0.021	-0.010	0.018	65	25	14	60
T6	-0.564	-0.027	-0.014	-0.004	0.090	64	33	20	59
T8	-0.092	0.000	0.011	0.283	118.571	65	25	11	37
T10	-0.098	-0.032	-0.020	-0.011	0.147	65	32	22	52
Ber1	-0.141	-0.086	0.154	1.763	8.376	16	7***	-	-
Che1	-0.092	-0.084	0.260	0.293	0.544	10	-	-	-
Che2	-0.268	-0.148	-0.016	0.148	0.409	16		0***	5***
Che3	-0.064	-0.059	0.001	0.240	0.642	16	7***	-	-
S1	-0.048	-0.005	0.033	0.234	0.506	16	20***	-	-
Sw1	-0.153	-0.103	0.011	0.274	0.477	12	-	35***	>45***
Sw2	0.028	0.157	4.877	8.187	9.329	12	-	-2***	0***
Sw3	-0.010	0.000	0.066	0.357	1.612	16	> 56***	-	-
Sw4	0.323	0.358	1.704	2.510	2.601	9	-	-	-
Sw5	0.483	4.379	8.276	20.518	32.760	3	-6***	-	-
Sw6	4.686	10.025	12.519	20.640	68.146	8	-	-10***	20***
Sw7	0.000	2.898	4.984	6.848	15.741	12	-15***	-	-

*положительные значения соответствуют выделению газа из почвы в атмосферу, отрицательные – потребление почвой газа из атмосферы;

**отрицательные значения соответствуют стоянию воды над поверхностью почвы;

***в столбце «медиана» – результат единичного измерения УПГВ, в столбцах мин. и макс. – результат двукратного измерения за период исследования.

Результаты и обсуждение. Характеристики вероятностных распределений УП CH₄ с поверхности почвы и характерные УПГВ приведены в табл. 1. Оторфованные участки в Тверской области (за исключением T8), являлись стоками метана несмотря на наличие торфа и болотной растительности. Объяснить это можно более глубоким залеганием УПГВ: во время измерений на участках присутствовала достаточная аэробная

зона в почве, что создавало условия для потребления CH₄ метанотрофными бактериями, а зачастую уровень воды опускался ниже торфяного горизонта – субстрата для метаногенеза. При этом максимальные значения потока CH₄ были больше 0, что свидетельствует о потенциально возможной эмиссии CH₄ на этих участках. Участок T8 при этом являлся устойчивым источником CH₄, что можно объяснить близким залеганием

уровня воды к поверхности и меньшей сомкнутостью крон – большой слой торфа, заполненный водой и достаточно прогреваемый, создаёт благоприятные условия для метаногенеза. На участках заболоченных лесов в Московской области в целом наблюдалась эмиссия CH_4 в атмосфере.

Несмотря на то, что измерения УПГВ здесь проводились на всех участках нерегулярно, при измерениях на этих участках визуально наблюдалась насыщенность почвы влагой на поверхности, что должно угнетать потребление метана и, напротив, способствовать его образованию.

Таблица 2. Удельные потоки CH_4^* , $\text{mgCH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ ч}^{-1}$ из стволов различных видов деревьев на исследуемых участках: обычным шрифтом – медианы, курсивом – размах от минимума до максимума.

Точка	Вид дерева					
	<i>Betula pendula</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Populus tremula</i>	<i>Quercus robur</i>
T1	0.003 <i>0 - 0.004</i>	0.000 <i>-0.004 - 0.004</i>				
T6	-0.001 <i>-0.005 - 0.005</i>	0.002 <i>0.001 - 0.003</i>				
T8	0.004 <i>0.002 - 0.013</i>		0.002 <i>0 - 0.012</i>			
T10	0.001 <i>0 - 0.011</i>		0.000 <i>-0.01 - 0.003</i>			
Che1	0.011 <i>-0.001 - 0.055</i>			0.000 **		
Che3	0.820 <i>0.193 - 0.92</i>		0.213 <i>0.006 - 0.344</i>	0.034 <i>0.006 - 0.062</i>		
S1			-0.012 <i>-0.028 - 0.003</i>			
Sw1					0.003 **	0.003 <i>0.002 - 0.009</i>
Sw2				0.025 <i>-0.017 - 0.208</i>		
Sw3		0.001 <i>0 - 0.001</i>		0.011 **	0.000 <i>-0.001 - 0.001</i>	
Sw6				0.108 <i>0.092 - 0.125</i>		

* положительные значения соответствуют выделению газа из ствола в атмосферу, отрицательные – потреблению стволем газа из атмосферы; приведены удельные значения потоков на ед. площади поверхности ствола;

** результат единичного измерения.

Результаты измерений потоков CH_4 из стволов деревьев приведены в табл. 2. В целом наблюдалась эмиссия CH_4 из стволов. Наличие выбросов из деревьев наблюдалось даже на участках, где почва в целом поглощала метан (Т1, Т6, Т10). При этом положительные значения потока CH_4 наблюдались для всех исследуемых видов деревьев.

Заключение. Таким образом, показано, что почвы заболоченных лесов могут выступать не только в роли стока метана, но и его источника. При этом наличие торфа не является предиктором, поток в значительной степени зависит от условий увлажнения. Стволы деревьев также могут выделять метан в атмосферу.

Работа Моченова С.Ю. и Глаголева М.В. выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соответственно, FFER-2022-0002 (тема № 1022031600002-1-1.6.19) и тема № 121040800146-3 «Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления». Работа Суворова Г.Г. и Мишиной М.С. поддержана 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).

1. Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е. [и др.] Эмиссия метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 4. С. 301-309.
2. Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В. [и др.] Новая карта болот южной тайги Западной Сибири для оценки эмиссии метана и диоксида углерода // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44, № 2. С. 209-220.
3. Barba J., Bradford M.A., Brewer P.E. [et al.] Methane emissions from tree stems: a new frontier in the global carbon cycle // *New Phytol.* 2019. V. 222, № 1. P. 18-28.
4. Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H. [et al.] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks // *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* – Cambridge University Press. 2023. P. 673-816.
5. Churkina A.I., Mochenov S.Yu., Sabrekov S.F. [et al.] Trees as methane sources: A case study of West Siberian South taiga // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2018. V. 138, № 1. P. 012002.
6. Davidson S.J., Strack M., Bourbonniere R.A. [et al.] Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes from a peat swamp vary by hydrogeomorphic setting // *Ecohydrology*. 2019. V. 12, № 8. P. e2162.
7. Elmes M.C., Davidson S.J., Price J.S. Ecohydrological interactions in a boreal fen–swamp complex, Alberta, Canada // *Ecohydrology*. 2021. V. 14, № 7. P. e2335.
8. Glagolev M.V., Ilyasov D.V., Terentieva I.E. [et al.] Methane and carbon dioxide fluxes in the waterlogged forests of south and middle taiga of Western Siberia // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2018. V. 138, № 1. P. 012005.
9. Glukhova T.V., Ilyasov D.V., Vompersky S.E. [et al.] Spatio-temporal variability of methane fluxes in boreo-nemoral alder swamp (European Russia) // *Forests*. 2022. V. 13, № 8. P. 1178.
10. Lohila A., Aalto T., Aurela M. [et al.] Large contribution of boreal upland forest soils to a catchment-scale CH₄ balance in a wet year // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, № 6. P. 2946-2953.
11. Megonigal J.P., Guenther A.B. Methane emissions from upland forest soils and vegetation // *Tree physiology*. 2008. V. 28, № 4. P. 491-498.
12. Mochenov S.Yu., Churkina A.I., Sabrekov S.F. [et al.] Soils in seasonally flooded forests as methane sources: A case study of West Siberian South taiga // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2018. V. 138, № 1. P. 012012.
13. Runkov R.A., Ilyasov D.V. Spatial variability of methane emissions from soils of wet forests: a brief review // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2023. V. 14, № 3. P. 167-180.
14. Sabrekov A.F., Danilova O.V., Terentieva I.E. [et al.] Atmospheric methane consumption and methanotroph communities in West Siberian boreal upland forest ecosystems // *Forests*. 2021. V. 12, № 12. P. 1738.
15. Siegenthaler A., Welch B., Pangala S.R. [et al.] Semi-rigid chambers for methane gas flux measurements on tree stems // *Biogeosciences*. 2016. V. 13, № 4. P. 1197-1207.
16. Ueyama M., Takeuchi R., Takahashi Y. [et al.] Methane uptake in a temperate forest soil using continuous closed-chamber measurements // *Agric. For. Meteorol.* 2015. V. 213. P. 1-9.

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ СВОБОДНОЙ ФАЗЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ТОРФЕ БУГРИСТЫХ БОЛОТ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

RAPID ASSESSMENT OF THE GREENHOUSE GASES FREE PHASE CONTENT IN THE Palsa Mires Peat on the Kola Peninsula

П.А. Рязанцев¹, С.А. Кутенков²
P.A. Ryazantsev¹, S.A. Kutenkov²

¹ Карельский научный центр РАН (г. Петрозаводск, Россия)

² Институт биологии – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск, Россия)
chthonian@yandex.ru
effort@krc.karelia.ru

На сегодняшний день общепринято, что текущие климатические изменения уже необратимо повлияли на некоторые Арктические экосистемы, в том числе водно-болотные угодья, ассоциированные с многолетнемерзлыми грунтами (Kreplin et al., 2021; Väliiranta et al., 2021). При этом доказано, что в арктических и бореальных регионах темпы анаэробного образования углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) увеличиваются не только в результате повышения температуры, но и из-за растительной сукцессии и повышения насыщения почвы водой, сопровождающих таяние мерзлоты (Treat et al., 2015).

Представленные исследования сфокусированы на изучении бугристых болот (пальза), которые представляют собой проявление мерзлотного пучения и содержат многолетнемерзлые породы. Бугристые болота Фенноскандии – уязвимые экосистемы, так как подвергаются значительной трансформации под воздействием климатических факторов (Olvmo et al., 2020). Современные модели прогнозируют их полное исчезновение уже к 2060–2080 гг. (Leppiniemi et al., 2023). В связи с деградацией мерзлоты бугристых болот ожидается и изменение уровня эмиссии парниковых газов, например резкий рост выбросов CH₄ при таянии мерзлоты и увеличение потока CO₂ и оксида азота (N₂O) при сукцессии растительности (Lagomarsino, Agnelli, 2020). В работе (Nykänen et al., 2003) показано, что поверхность мерзлых бугров с растительностью служит поглотителем CO₂, а без – источником, там же отмечена разница в потоке CH₄ на вершине и окрайке пальза. Новые данные по эмиссии CO₂ и CH₄ бугристых болот Сибири показали их сезонную изменчивость (Olchev et al., 2022) и необходимость учета абиотических факторов (Matyshak et al., 2023).

В связи с чем, в работе рассматривается экспериментальная полуколичественная экспресс-оценка свободных газов в торфе деградирующих бугров мерзлотного пучения, на примере болот, расположенных на восточном побережье Кольского полуострова. Предполагается, что повышенное содержание газовой фазы в торфе маркирует потенциальные участки с наиболее высоким уровнем эмиссии, которая в свою очередь может быть оценена традиционным методом камер.

Сбор полевых данных выполнялся в рамках комплексной экспедицией КарНЦ РАН в период с 4 по 15 июля 2022 г. Для проведения исследований были выбраны три экспериментальные площади, расположенные на восточной оконечности Кольского полуострова. Первая площадь «Качковка» расположена в 1,6 км к западу от берега Белого моря, 3,4 км к СЗ от устья р. Качковка. Измерения выполнены в пределах отдельного крупного плоского торфяного мерзлого бугра, размером 50×20 м, высотой до 1,5 м, который имеет явные следы таяния по периметру. Вторая площадь – «Терско-Орловский» расположена в центральной части Терско-Орловского мыса, в 1,7–1,9 км от берега моря. Исследуемая площадь была локализована в неглубокой, занятой торфом депрессии (60×70 м), где расположены небольшие бугры пучения. Третья площадь – «Поной» приурочена к бугристому комплексу, который находится в 2 км на запад от берега моря в районе устья р. Поной. Исследованный комплекс вытянут по неглубокой ложбине с севера на юг на 490 м, при ширине до 100 м. В его пределах выделяется не менее 10 бугров пучения высотой 1–2,5 м как простой куполообразной, так и более сложной формы.

На всех экспериментальных площадях выполнялся единый комплекс исследований, включающий аэрофотосъемку, наземное ботаническое описание, изучение стратиграфии торфяной залежи, полуколичественную оценку свободной фазы газов. На основе аэрофотосъемки определялись места наземных ландшафтных и ботанических описаний. В наиболее представительной части закладывался почвенный разрез для детального описания и отбора проб торфа.

Содержание свободной фазы газов оценивалось на основе методики с принудительной экстракцией, предложенной для изучения биогенных газов в северных торфяниках (Comas et al., 2011). Измерения выполнялись при помощи герметичной статической камеры, заглубленной в торф на 15 см от поверхности земли и соединенной с портативным газовым анализатором «Комета-М» с системой принудительного забора воздуха (НПП Дельта). Газоанализатор имеет калиброванные оптические датчики измерения CO_2 , CH_4 и водорода (H_2). Считается, что камеры улавливают фоновый поток, в основном исходящий из верхнего слоя торфа (20–30 см) (Comas et al., 2011).

Предполагается, что за счет принудительной откачки газовой фазы из торфа формируется «горячая точка», где происходит вскипание биогенных газов и их экстракция из верхнего слоя торфа (20–30 см) по пробоотборнику к измерительным датчикам (Comas et al., 2011). Так как этот эффект кратковременный, то время экспозиции составляло 5 минут. Наблюдения выполнялись по набору точек, положение которых определялось с учетом микроморфологических особенностей, влажности и состава растительности.

Анализ содержания свободной фазы биогенных газов в торфе на всех участках показал четкую приуроченность высокого содержания $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ к термокарстовым мочажинам. В свою очередь, торф талой окрайки бугров имеет повышенное содержание CO_2 . Сравнение полученных результатов приводится в таблице. Наибольшее количество относительно слабопродуктивных в отношении выработки газов мочажин находится на площади «Поной». Этот участок отличается крайне слабой степенью разложения и плотностью торфа, что может свидетельствовать о более устойчивых анаэробных условиях, связанных с большей насыщенностью водой торфяной толщи. Самый большой уровень CO_2 установлен на площади «Качковка», что объясняется наибольшим (до 40% покрытия) развитием травяно-кустарничкового яруса. Для сравнения, на «Терско-Орловском» он занимает до 20%, а на площади «Поной» до 25%.

Таблица. Показатели содержания свободной фазы биогенных газов в торфе на экспериментальных площадях

Площадь	CH_4 (%)			CO_2 (%)		
	Мин.	Макс.	Ср.	Мин.	Макс.	Ср.
Качковка (n=19)	0,06	3,32	0,55	0,05	3,48	0,85
Терско-Орловский (n=16)	0,14	2,63	0,54	0,05	1,22	0,30
Поной (n=23)	0,06	2,04	0,42	0,04	1,06	0,16

Для более детального анализа было выполнено сопоставление всех точек наблюдения, где также использовалось процентное содержание H_2 в газовой фазе торфа (рис.). Оценка выявила значимую разницу в уровне экстракции в зависимости от условий опробования. Анализ содержания H_2 показал, что в мочажинах протекает ацетотрофный метаногенез, хотя для влажных условий характерен в первую очередь гидрогенотрофный тип (Galand et al., 2005). Однако в условиях богатого минерального питания и влияния сосудистых растений (*Carex*, *Eriophorum*) в верхних слоях торфа увеличивается уровень разложения ацетата. Вероятно, это характерно и для изученных бугристых болот, т.к. мочажины имели здесь преимущественно осоково-пушицево-сфагновый покров. Это еще раз подчеркивает влияние таяния мерзлоты и сопутствующей сукцессии на уровень выбросов парниковых газов. Пространственное распределение свободной фазы биогенных газов в торфе указывает, что непосредственно на буграх потоки газов будут минимальные, а в обрамляющих их мочажинах максимальные.

Выполненные работы по оценке свободной фазы газов в арктических торфяниках Кольского полуострова показали важность комплексного подхода к изучению таких объектов. Уровень накопления биогенных газов может в равной степени зависеть от как свойств торфяной залежи и ее гидрологии, так и состава растительного покрова и морфологии поверхности. Использованный подход к оценке естественного газового потока водно-болотных угодий, несмотря на полуколичественный характер показаний, позволил за короткое время получить набор данных с учетом пространственной изменчивости бугров, и в итоге выявить факторы, оказывающие влияние на уровень свободной газовой фазы в торфе. Полученные результаты свидетельствуют о значительной дифференциации изученных площадей с точки зрения продуцирования парниковых газов.

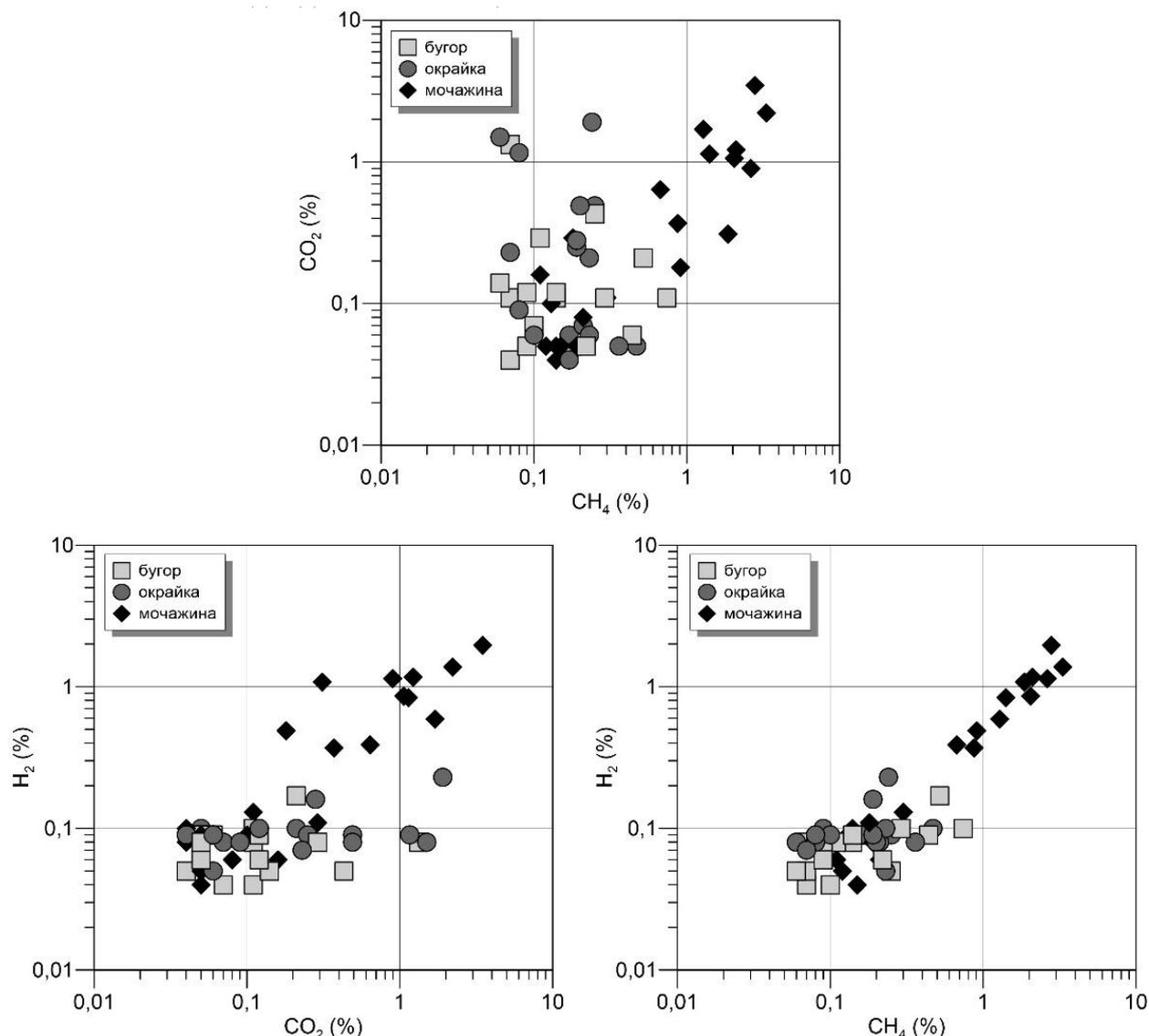


Рис. Диаграммы содержания CH₄, CO₂ и H₂ в свободной фазе газа в торфе в зависимости от условий отбора

Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН.

1. Comas X., Slater L., Reeve A. S. 2011. Atmospheric pressure drives changes in the vertical distribution of biogenic free-phase gas in a northern peatland // *J. Geophys. Res.*, 116, G04014.
2. Galand P.E., Fritze H., Conrad R., Yrjala K. 2005. Pathways for methanogenesis and diversity of methanogenic Archaea in three boreal peatland ecosystems // *Appl. Environ. Microb.*, 71(4), 2195–2198.
3. Kreplin H.N., Santos Ferreira C.S., Destouni G., Keesstra S.D., Salvati L., Kalantari Z. 2021. Arctic wetland system dynamics under climate warming // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(4), e1526.
4. Lagomarsino A., Agnelli A.E. 2020. Influence of vegetation cover and soil features on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in northern Finnish Lapland // *Polar Science*, 24, 100531.
5. Leppiniemi O., Karjalainen O., Aalto J., Aalto J., Luoto M., Hjort J. 2023. Environmental spaces for palsas and peat plateaus are disappearing at a circumpolar scale // *The Cryosphere*, 17, 3157–3176.
6. Matyshak G.V., Chuvanov S.V., Goncharova O.Y., Trifonova V.A., Timofeeva M.V., Isaeva A.V., Tarkhov M.O. 2023. Influence of Moisture on the CO₂ Flux from Palsa Mire Soils in the North of Western Siberia // *Eurasian Soil Sc.*, 56, 434–446.
7. Nykänen H., Heikkinen J.E., Pirinen L., Tiilikainen K., Martikainen P.J. 2003. Annual CO₂ exchange and CH₄ fluxes on a subarctic palsa mire during climatically different years // *Global biogeochemical cycles*, 17(1), 1018.
8. Olchev A., Zyrianov V., Panov A., Satosina E., Mukhartova I., Novenko E., Prokushkin A. 2022. Seasonal Variability of Carbon Dioxide and Methane Fluxes in a Subarctic Palsa Mire in North-Central Siberia // *Environ. Sci. Proc.*, 19, 52.

9. Oivmo M., Holmer B., Thorsson S., Reese H., Lindberg F. 2020. Sub-arctic palsas degradation and the role of climatic drivers in the largest coherent palsa mire complex in Sweden (Vissátvuopmi), 1955–2016 // *Scientific Reports*, 10, 8937.
10. Treat C.C., Natali S.M., Ernakovich J., Iversen C.M., Lupascu M., McGuire A.D., Norby R.J., Chowdhury T.R., Richter A., Šantrůčková H., Schädel C., Schuur E.A.G., Sloan V.L., Turetsky M.R., Waldrop M.P. 2015. A pan-Arctic synthesis of CH₄ and CO₂ production from anoxic soil incubations // *Global Change Biology*, 21(7), 2787–2803.
11. Väiliranta M., Marushchak M.E., Tuovinen J.P., Lohila A., Biasi C., Voigt C., Zhang H., Piilo S., Virtanen T., Räsänen A., Kaverin D., Pastukhov A., Sannel A.B., Tuittila E-S., Korhola A., Martikainen P.J. 2021. Warming climate forcing impact from a sub-arctic peatland as a result of late Holocene permafrost aggradation and initiation of bare peat surfaces // *Quaternary Science Reviews*, 264, 107022.

ВЛИЯНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ НА ПОТОКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И СКРЫТОГО ТЕПЛА В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

EFFECTS OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION ANOMALIES ON CARBON DIOXIDE AND LATENT HEAT FLUXES IN WETLAND ECOSYSTEMS

*Е.М. Сатосина^{1,2}, Д.Ю. Гущина¹, М.А. Тарасова¹, Р.Р. Гибадуллин¹,
И.В. Железнова¹, Е.Р. Емельянова², А.М. Осипов¹, А.В. Ольчев¹.
E. Satosina^{1,2}, D. Gushchina¹, M. Tarasova¹, R. Gibadullin¹, I. Zheleznova¹,
E. Emelianova², A. Osipov¹, A. Olchev¹.*

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

² Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН (г. Москва, Россия)

e-mail: lisan.sat@gmail.com

В ходе данного исследования была проведена комплексная оценка отклика болотных экосистем умеренных и полярных широт, расположенных на различных континентах, на экстремальные явления погоды, которые включали аномалии температур (аномально высокие/низкие температуры) и аномалии осадков (засухи/интенсивные осадки). Для анализа отклика потоков CO₂ и скрытого тепла (LE) на экстремальные явления температур и осадков использовались данные реанализа ERA5 (Smith, 2011) и данные наблюдений за потоками CO₂ и скрытого тепла, полученные из глобальной базы сети FLUXNET (<https://fluxnet.org/data/>). Для исследования были выбраны 15 станций мониторинга потоков парниковых газов, которые представляли собой наиболее продолжительные и непрерывные ряды наблюдений. Станции расположены на разных континентах, 8 мониторинговых станций в умеренных широтах и 7 в полярных. Все станции согласно классификации IGBP относятся к водно-болотным угодьям.

Анализ отклика потоков CO₂ и скрытого тепла на аномалии температур и осадков выявил, что реакция болотных экосистем в умеренных и полярных широтах может существенно отличаться. Эти различия могут быть обусловлены географическим положением экосистем, региональными климатическими особенностями, видовым составом растительности, а также интенсивностью экстремумов температур и осадков. В течение теплого полугодия в периоды экстремально высоких температур в умеренных широтах наблюдалась положительная аномалия потока CO₂, соответствующая усилению эмиссии CO₂ в атмосферу. В полярных широтах наблюдался противоположный отклик – увеличение поглоще-

ния CO₂ болотными экосистемами при аномально высоких температурах. В данном случае противоположный отклик потоков CO₂ может быть связан с отличиями в режиме увлажнения почвы в болотных экосистемах полярных широт, а также с различным видовым составом растительности. Экстремально высокие значения температуры сопровождались положительными аномалиями LE из-за интенсификации процессов испарения с повышением температуры, подобная тенденция наблюдалась во всех исследуемых болотных экосистемах.

Мгновенный отклик болотных экосистем на интенсивные осадки (превышающие 95% квантиль) практически на всех рассматриваемых станциях проявлялся в виде увеличения потока CO₂ в атмосферу. Наблюдаемый отклик может быть связан с «эффектом Бирча» (Birch, 1964) который проявляется в интенсификации почвенного дыхания в результате резкого повышения влажности почвы и, как следствие, увеличения скорости разложения и минерализации органического вещества при сильных осадках и повышении уровня грунтовых вод. Поток LE при интенсивных осадках уменьшается, что указывает на подавление испарения из-за высокой влажности воздуха и снижения приходящей солнечной радиации. Следует также отметить, что процент дней с увеличением поглощения CO₂ в течение двух недель после интенсивных осадков существенно выше, чем для мгновенного отклика. Продолжительное отсутствие осадков, которое представлено экстремально низкими значениями API, сопровождается на большинстве рассматриваемых станций болотных экосистем отрицательными аномалиями потока CO₂ (усиление поглощения).

Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 22–17–00073.

1. Birch, H.F. (1964) Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions. *Plant Soil*, 20, 43–49.
2. Smith, M.D. (2011) An ecological perspective on extreme climatic events: A synthetic definition and framework to guide future research. *J. Ecol.* 99, 656–663.
3. The Data Portal serving the FLUXNET community. [Электронный ресурс]: <https://fluxnet.org/data/>, свободный. – Загл. с экрана

ФЛОРА, ПАРАМЕТРЫ ДРЕВОСТОЯ И ГАЗООБМЕН НИЗИННОГО ЛЕСНОГО БОЛОТА (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА ПАКЛИНСКОЕ, СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

FLORA, TREE STAND PARAMETERS AND GAS EXCHANGE OF A EUTROPHIC FOREST MIRE (USING THE EXAMPLE OF THE PAKLINSKOE MIRE, SVERDLOVSK REGION, RUSSIA)

A.C. Третьякова^{1}, А.А. Кочубей¹, В.А. Лебедев¹, Н.Ю. Груданов¹, Д.К. Диярова², С.А. Сенатор³, Д.А. Филиппов^{4,1*}*
A.S. Tretyakova^{1}, A.A. Kochubey¹, V.A. Lebedev¹, N.Yu. Grudanov¹, D.K. Diyarova², S.A. Senator³, D.A. Philippov^{4,1*}*

¹ Ботанический сад УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

² Институт экологии растений и животных УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

³ Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН (г. Москва, Россия)

⁴ Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (с. Борок, Россия)

E-mail: philippov_d@mail.ru

Введение. В августе 2023 г. впервые были проведены комплексные исследования бол. Паклинское – охраняемого (как гидрологический и ботанический памятник природы регионального значения) болота, расположенного севернее п. Новоасбест и северо-восточнее п. Вилюй (N 57.78515°, E 60.30010°; Горноуральский г.о., Свердловская обл.). Оно имеет площадь 3.40 км² и характеризуется как низинное, сильно облесённое, с выходами грунтовых вод; мощность торфяных залежей достигает 4.4 м (хотя средняя глубина всего 1.25 м); преобладают низинные осоковые и древесно-осоковые торфа (степень разложения 25–45%, средняя зольность 11.7%) (Торфяной..., 1955; Торфяные..., 1976). Основные задачи заключались в выявлении и анализе флоры болота, изучении основных параметров древостоя и измерении потоков CO₂ и CH₄ на лесном низинном болотном участке бол. Паклинское.

Особенности флоры. Флора бол. Паклинское насчитывает 93 вида сосудистых растений, относящихся к 60 родам и 33 семействам, из четырёх отделов: Equisetophyta (4, 1, 1), Polypodiophyta (5, 4, 4), Pinophyta (5, 4, 2), Magnoliophyta (79, 51, 26). Magnoliopsida существенно преобладает над Liliopsida (56 видов, 38, родов, 20 семейств против 23, 13, 6, соответственно). В семейственно-видовом спектре доминируют характерные для болотных флор Сурегасеае (11 видов), Ericaceae и Rosaceae (по 10), Orchidaceae и Salicaceae (по 5). Наиболее крупные рода: Carex (10 видов), Salix и Rubus (по 5). В целом, достаточно высокое флористическое разнообразие этого болота, вероятно, объясняется наличием болотных участков

напорного грунтового питания и облесённым характером фитоценозов.

По характеру долготного распространения во флоре болота существенно преобладают (почти 80%) голарктические (50 видов), евразийские (9) и европейско-западноазиатские (12) виды. На бореальный (40 видов) и плюризональный (19) широтные элементы приходится более 60% флоры, тогда как группа «северных» видов представлена лишь единичными видами (гипоаркто-бореальные – 7, арктобореальные – 3).

В биоморфологическом плане (по: Серебряков, 1962) среди всех групп абсолютное большинство составляют поликарпические травы (56%), в особенности корневищные (32 вида), а также столонообразующие и ползучие (7). На втором месте по участию в сложении болотной флоры располагается группа древесных растений (28 видов), причём преобладают кустарниковые формы (13). Группа высших споровых растений насчитывает 9 видов: корневищные травянистые хвощи (4) и корневищные травянистые папоротники (5). Совсем небольшим числом видов (3) представлены монокарпические травы (3).

В составе флоры бол. Паклинское имеются региональные редкие и охраняемые виды (Красная..., 2018): *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, *D. fuchsii* (Druce) Soó (V категория), *D. maculata* subsp. *fuchsii* (Druce) Hyl., *Goodyera repens* (L.) R. Br., *Malaxis monophyllos* (L.) Sw., *Listera ovata* (L.) R. Br. (все 4 – III категория). Кроме того, обнаружены нуждающиеся в охране на территории Свердловской обл. виды (Князев и др., 2016, 2019): *Equisetum scirpoides* Michx. и *Rubus chamaemorus* L.

Параметры древостоев, естественного возобновления подроста и постпирогенных сукцессии. Состав древостоя на изученном болоте: 9С1Е, относительная полнота древостоя – 0.6–0.7. Преобладающая древесная порода – *Pinus sylvestris* L. (высота до 14.5 м, максимальный диаметр 33 см, бонитет V). *Picea obovata* Ledeb. встречается во всех ярусах древостоя (высота от 3.5 до 13 м (в среднем 9.5 (преимущественно относится ко II ярусу)). На деревьях отмечены следы пожаров, разновысотные гари, раневые раны. В составе подлеска встречается *Juniperus communis* L., признаков естественного возобновления основных пород (сосна, ель) не обнаружено.

Возрастной анализ кернов показал, что деревья на участках составляют 3 генерации, которые достаточно близковозрастны и, вероятно, имеют постпирогенное происхождение, т.е. всходы древесных растений появляются в первые годы после пожара (Санников и др., 2004). Материнский древостой сосны имеет средний возраст 170 лет (с максимумом 190 лет), высоту 13–14.5 м, диаметр 25–33 см; второе поколение представлено деревьями возраста 120–125 лет (диаметр 20–22 см); третье поколение имеет возраст 80–82 года (диаметр 10–17 см, высота 8–10 м). Первые два поколения образуют I ярус, третье поколение преимущественно относится ко II ярусу.

Анализ пожарных выпиллов, спилов и кернов позволил ретроспективно проследить достаточно чёткую периодизацию пожаров: древостой горел около 40, 60 и 80 лет назад. Более молодых следов гари не было обнаружено. В части спилов и кернов наблюдаются следы пожаров 95- и 120-летней давности. Пожар 120-летней давности косвенно подтверждается наличием второй генерации древостоя (120–125 лет).

Измерение высоты кочек и проективного покрытия живого напочвенного покрова в пределах модельного участка (на 25 учётных площадках, площадью 1 м² каждая) показало, что средняя высота моховых кочек составила 31.5±12.9 см (максимум 50 см), осоковых кочек – 40.7±14.2 см (максимум 60 см), при средних параметрах. Проективное покрытие достигало 98%, при среднем значении 87±6%. Толщина мохового слоя достигала 10 см, в среднем – около 5.5–6 см. Полу-

ченные данные говорят о длительном отсутствии огневого поражения, что соответствует полученным пожарным датировкам.

Оценка семеношения сосны по методу Лехто (Lehto, 1956) (на основе учёта шишек, опавших в моховой очёс на учётных площадках) показала, что оно достаточное и вполне обильное для болотного биогеоценоза – 62.2±13.9 тыс. га/год, но при этом молодого подроста и всходов хвойных растений обнаружено не было. В основном это объясняется наличием достаточно мощного мохового очёса, который не позволяет упавшим семенам успешно укорениться и давать новую генерацию.

Газообмен. Измерение потоков CO₂ (NEE) и CH₄ проведено камерным методом с помощью многокомпонентного газоанализатора Gasmeter модель DX-4030 (“Gasmeter Technologies Oy”, Финляндия). Для измерения прозрачную экспозиционную камеру объёмом 1.47 л устанавливали в пределах модельной площади на облесённом низинном болотном участке на различных формах микрорельефа: кочки высотой 20–35 см и межкочья. Время для стабилизации потока CO₂ после установки камеры составляло от 10 до 60 сек. Продолжительность одного измерения составляла 3 мин; повторность трёхкратная; перед каждым последующим измерением камеру проветривали. По разности концентраций CO₂ CH₄ в начале и в конце экспозиции, а также с учётом времени экспозиции рассчитывали величину потока в мг CO₂ м⁻² ч⁻¹ и мг CH₄ м⁻² ч⁻¹ (Смагин, 2012; Мигловец и др., 2014). В результате исследования (табл. 1), средняя величина CO₂ для положительных микроформ составила -14.29±0.83, а для межкочий – 36.72±4.16 мг м⁻² час⁻¹, что ярко подчёркивает влияние микрорельефа как на направление потока CO₂, так и на его величину, что ранее отмечали уже и другие исследователи (Михайлов и др., 2011). Для CH₄, наиболее высокие значения характерны для межкочий – 7.41±0.64 CH₄, мг м⁻² час⁻¹ против 2.12±0.29 CH₄, мг м⁻² час⁻¹ для кочек, что также согласуется с результатами работ коллег (Шнырев, Глаголев, 2007). Также следует отметить тесную связь потока метана с температурой почвы как для кочек (r = 0.45, p = 0.04), так и для межкочечных пространств (r = 0.68, p = 0.01).

Таблица 1. Потоки CO₂ и CH₄ на разных участках микрорельефа низинного лесного болота (m±SE)

Микрорельеф	T, °C почва	T, °C воздух	CO ₂ , мг м ⁻² час ⁻¹	CH ₄ , мг м ⁻² час ⁻¹
Кочка (n=12)	21.85±3.56	26.1±0.36	-14.29±0.83	2.12±0.29
Межкочечное пространство (n=14)	15.42±1.19	25.8±0.17	36.72±4.16	7.41±0.64

Для оценки эмиссионной активности торфяной залежи, с использованием пробоотборника для почвы и торфяных отложений (торфяного бура) Eijkelkamp (Нидерланды), был произведён послыйный отбор торфяного керна от поверхности до материнской породы (глина) (мощность залежи в месте отбора составила 2.40 см). Образцы торфа, отобранные через каждые 10 см, помещали в экспозиционную камеру объёмом 1.47 дм³. По разности концентраций CO₂ и CH₄ в камере в начале и в конце экспозиции, а также с учетом времени экспозиции (3 мин) рассчитывали скорость эмиссии в мг CO₂ г⁻¹ ч⁻¹ и мг CH₄ г⁻¹ ч⁻¹. Температуру воздуха и почвы регистрировали с

помощью четырёхканального цифрового термометра CENTER (Center, Тайвань) с термодатчиками К типа. Абсолютно-сухую массу образцов торфа определяли по завершению экспериментальных работ, высушивая их в камеральных условиях при температуре 105°C в течение 72 часов. В табл. 2 представлены усреднённые значения эмиссии диоксида углерода и метана, а также качественный состав других газообразных соединений в зависимости от глубины залегания торфа. Наибольшее количество сопутствующих продуктов, а также максимальные значения потоков CO₂ и CH₄ обнаружены на глубине от 1.0 до 2.0 м, минимальные – от 2.0 до 2.4 м (придонные слои).

Таблица 2. Потоки CO₂ и CH₄ в торфяной залежи бол. Паклинское на различной глубине (m±SE)

Глубина, см	CO ₂ , мг г ⁻¹ час ⁻¹	CH ₄ , мг г ⁻¹ час ⁻¹	Сопутствующие продукты
0–50	9.33±1.98	0.11±0.01	C ₂ H ₆ , NO, N ₂ O
50–100	7.63±0.57	0.15±0.01	C ₂ H ₆ , NO, N ₂ O
100–150	10.71±1.54	1.24±0.08	C ₂ H ₆ , NO, CH ₃ Cl, N ₂ O, NH ₃
150–200	10.66±1.21	1.23±0.04	C ₂ H ₆ , NO, CH ₃ Cl
200–240	4.56±0.19	0.09±0.02	C ₂ H ₆ , NO

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации: № 123112700111-4 (Ботанический сад УрО РАН), № 122042700002-6 (ГБС РАН), № 124032100076-2 (ИБВВ РАН).

1. Князев М.С., Золотарёва Н.В., Подгаевская Е.Н., Третьякова А.С., Куликов П.В. Конспект флоры Свердловской области. Часть I: споровые и голосеменные растения // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2016. Т. 10, №4. С. 11–41.
2. Князев М.С., Чкалов А.В., Третьякова А.С., Золотарёва Н.В., Подгаевская Е.Н., Пакина Д.В., Куликов П.В. Конспект флоры Свердловской области. Часть V: двудольные растения (Rosaceae) // Фиторазнообразие Восточной Европы. 2019. Т. 13, №4. С. 305–352.
3. Красная книга Свердловской области: животные, растения, грибы. 2018. Екатеринбург: ООО «Мир». 450 с.
4. Мигловец М.Н., Загирова С.В., Михайлов О.А. 2014. Эмиссия метана в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. №1. С. 93–98.
5. Михайлов О.А., Загирова С.В., Мигловец М.Н., Шнайдер Ю., Гажович М., Кутцбах Л. 2011. Оценка потоков диоксида углерода в растительных сообществах мезо-олиготрофного болота средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. №2. С. 44–51.
6. Санников С.Н., Санникова Н.С., Петрова И.В. 2004. Естественное лесовозобновление в Западной Сибири (эколого-географический очерк). Екатеринбург: УрО РАН. 198 с.
7. Смагин А.В. 2012. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 544 с.
8. Торфяной фонд Свердловской области (по состоянию разведанности на 01.01.55). 1955. М. 419 с.
9. Торфяные месторождения Свердловской области. 1976. М. 500 с.
10. Шнырев Н.А., Глаголев М.В. 2007. Характерные значения потоков метана из болот Западной Сибири // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: Прошлое и настоящее: материалы второго междунар. полевого симп. Томск: НТЛ. С. 144–146.
11. Lehto J. 1956. Tutkimuksia männyn luontaisesta uudistumisesta Etelä-Suomen kangasmailla // Acta Forestalia Fennica. Vol. 66, №2. P. 1–106.

Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed mire ecosystems. Biogeochemistry of peats and mire waters

Carbon balance and carbon cycle modeling

Биогеохимические циклы естественных и антропогенно-нарушенных болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод.

Углеродный баланс и моделирование углеродного цикла

A PRELIMINARY STUDY OF TRACING METHANE SOURCES USING CARBON ISOTOPES IN XI'AN, CHINA

Shugang Wu

Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences (China)
e-mail: wusg@ieecas.cn

Methane is the second most anthropogenic greenhouse gases. Quantifying the contributions of the main sources to the atmospheric methane is important to reduce the methane emissions and to better predict the future climate change. Carbon isotopes are useful to tracing sources of atmosphere methane. Radiocarbon can help to determine the age of the source methane, and the stable carbon can be used to determine the pathway of methane generation. However, the study of tracing methane source using radiocarbon is still limited, because the sample preparation process for atmospheric methane is very complicated. Here we established the experimental procedure for methane radiocarbon in

atmospheric samples. The results of chemical blanks are good, close to 50000 years. The radiocarbon content of the atmospheric methane is obviously lower than that at background site, and also lower than in the recent studies at other sites. The calculated fossil CH_4 in November based on radiocarbon shows that the excess methane is mainly from fossil source. The stable carbon isotope of the excess methane estimated using online measurement of CH_4 concentration and its stable carbon isotope with Keeling-plot method equals to the stable carbon isotope of methane in natural gas in Xi'an. The experimental process is also suited for methane collected from peatlands and other environment.

CHANGING MICROBIOME COMMUNITY STRUCTURE AND FUNCTIONAL POTENTIAL DURING PERMAFROST THAWING ON THE TIBETAN PLATEAU

Xiaotong Tang¹, Zhengkun Fang¹, Jiaxing Zhou¹, Bixi Zhao², Tongyu Fan¹, Chuanlun Zhang³, Yu Xia², Yanhong Zheng^{1*}

¹ State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, (Xi'an, Shaanxi 710069, China)

² School of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Southern University of Science and Technology (Shenzhen, Guangdong 518055, China)

³ Shenzhen Key Laboratory of Marine Archaea Geo-Omics, Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology (Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Large amounts of carbon sequestered in permafrost on the Tibetan Plateau (TP) are becoming vulnerable to microbial decomposition in a warming world. However, knowledge about how the responsible microbial community responds to warming-induced permafrost thaw on the TP is still limited. This study aimed to conduct a comprehensive comparison of the microbial communities and their functional potential in the active layer of thawing permafrost on the TP. We found that the microbial communities were diverse and varied across soil profiles. The microbial diversity declined and the relative abundance of *Chloroflexi*, *Bacteroidetes*, *Euryarchaeota*, and *Bathyarchaeota* significantly increased with permafrost thawing. Moreover, warming reduced the similarity and stability

of active layer microbial communities. The high-throughput qPCR results showed that the abundance of functional genes involved in labile carbon degradation and methanogenesis increased with permafrost thawing. Notably, the significantly increased *mcrA* gene abundance and the higher methanogens to methanotrophs ratio implied enhanced methanogenic activities during permafrost thawing. Overall, the composition and functional potentials of the active layer microbial community in the Tibetan permafrost region are susceptible to warming. These changes in the responsible microbial community may accelerate carbon degradation, particularly in the methane releases from alpine permafrost ecosystems on the TP.

ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБВОДНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИЗИННОГО БОЛОТА УМЕРЕННОЙ ЗОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MIKE SHE

HYDROLOGICAL MODELING OF REWETTING AND RESTORATION OF TEMPERATE ZONE FEN IN MIKE SHE

*А.А. Алавердова¹, Е.М. Гоконова¹, Т.Ю. Минаева², Л.Ю. Макарова³, К.Л. Шахматов⁴
A. Alaverdova¹, E. Gokonova¹, T. Minayeva², L. Makarova³, K. Shakhmatov⁴*

¹ ООО «ЭКХАЙДЕН» (г. Москва, Россия)

² ООО "Care for Ecosystems" (Германия)

³ Институт Лесоведения РАН (с. Успенское, Россия)

⁴ Тверской государственный технический университет (г. Тверь, Россия)

e-mail: alaverdova2001@yandex.ru gokonova@echyden.ru

В настоящее время актуальной проблемой является отрицательное воздействие на окружающую среду процессов, происходящих на осушенных и более не используемых, не рекультивированных торфяниках, включая торфяные пожары, эмиссию парниковых газов в результате аэробного разложения торфа и с поверхности водных объектов и дренажных канав, потерю способности удерживать или очищать поверхностные воды, потерю биологического разнообразия, равно как и иных экологических функций и экосистемных услуг. Вторичное заболачивание осушенных и заброшенных торфяников является актуальной задачей как для смягчения изменений климата (Sirin et al., 2021), так и адаптации к ним, в частности путём снижения пожарной опасности и оптимизации водопрпускной способности ландшафта. Вторичное заболачивание достигается путём обводнения осушенного торфяника и, как следствие, самозаращения его поверхности гидрофильной растительностью, включая мохообразные и влаголюбивые сосудистые растения. В условиях избыточного увлажнения повышение уровня почвенных (болотных) вод на большей части торфяника может быть достигнуто за счёт размещения перемычек на дренирующих каналах. Для проверки эффективности данной методики была построена гидрологическая модель водосбора болота в программном комплексе MIKE SHE с использованием климатического прогноза CMIP5 по сценарию RCP 6.0 до 2050 года.

Объект исследования. Болотный массив «Драковское болото» площадью 89 га находится

в Дзержинском районе Калужской области в границах охранной зоны Национального парка «Угра». Болото расположено в палеоизлучине, на пологом склоне нижней террасы левого берега реки Угра, вытянуто вдоль ручья, притока реки Угра, и относится к типу пойменных переходных болот. В прошлом веке торфяная залежь была осушена с помощью дренажной сети, образованной магистральным каналом в виде углубленного и спрямленного русла ручья и сети вторичных валовых каналов (рис. 1). После осушения болото использовалось для добычи торфа и частично для сенокосения. В настоящее время болотный массив частично залесён, более половины площади занимают сорно-луговые ландшафты.

Для целей оптимизации режима землепользования в охранной зоне национального парка и в качестве вклада в выполнение климатических обязательств Российской Федерации был разработан проект «Разработка проекта обводнения (вторичного заболачивания) выработанного торфяного месторождения «Драковское» площадью 89 га на территории охранной зоны национального парка «Угра» в Дзержинском районе Калужской области» в соответствии с концепцией плана обводнения. Особенностью проектирования данного объекта является выделение в границах проектной территории участков, перспективных для разных видов использования. Устройство перемычек и дамб планируется таким образом, чтобы наиболее эффективно реализовать схему размещения участков, перспективных для разных видов использования (рис. 1).

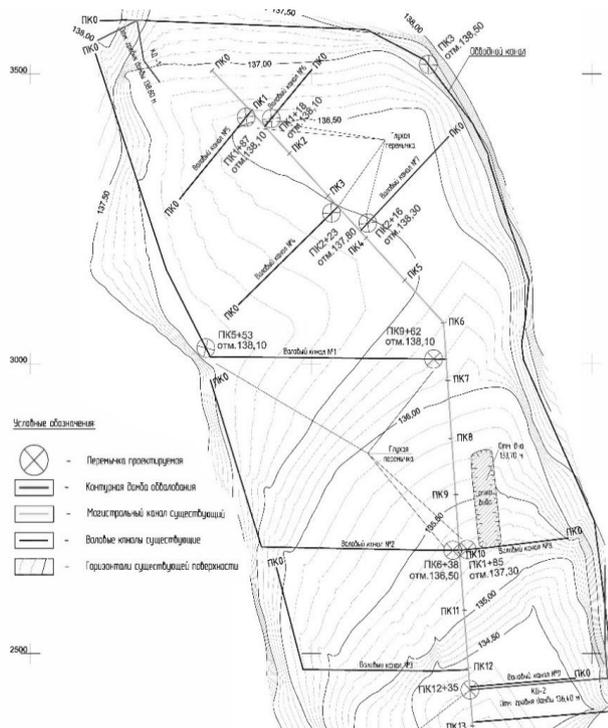


Рис. 1. Схема проектируемых перемычек на дренажных каналах

Задачи. В результате исследования необходимо составить гидрологическую модель всего водосбора болота и, используя два сценария расчёта: с современным состоянием сети дренажных каналов (без перемычек) и с учетом запроектированных дамб, качественно оценить эффективность проекта перемычек (дамб) на каналах. Цель постройки перемычек – задержание болотных вод в торфяной залежи, в результате которого произойдет повышение уровня болотных вод, обводнение и насыщение торфяной залежи и создание условий для восстановления растительного покрова. В качестве индикатора эффективного обводнения принят уровень болотных вод. Концепция вторичного заболачивания предполагает сохранение нескольких участков с пониженным уровнем болотных вод для использования местным населением в качестве сенокосов, и наоборот – участков с открытой водной поверхностью для создания местообитаний для гнездящихся околоводных птиц.

Методы. Используемая модель MIKE SHE относится к классу детерминистических физико-математических моделей полного цикла и включает блоки поверхностного стока, почвенного стока, грунтовых вод, эвапотранспирации и растительного покрова (Cirulis et al., 2021). В качестве исходных данных в модель вводятся параметры характеристик растительного покрова на водосборе, начальные уровни болотных вод, параметры характеристик почвы (коэффици-

ент фильтрации, ОГХ, пористость) и начальная влажность в зоне аэрации (если известна), климатический прогноз. Также, как дополнительный блок расчёта, подключается одномерная гидродинамическая модель дренажной сети. В климатический прогноз входят такие параметры, как суточная сумма осадков и среднесуточная температура, а также потенциальная эвапотранспирация. Приблизительно до середины столетия температурные показатели сценариев CMIP5 слабо различаются, поскольку даже в случае снижения эмиссии парниковых газов по сценарию RCP 2.6, ввиду инерционности климатической системы, резкого «охлаждения» климата не произойдет (IPCC, 2013); в данном исследовании принят сценарий RCP 6.0. В результате расчёта можно получить двумерную картину таких характеристик, как влажность в зоне аэрации, уровень болотных вод, информацию о подземных потоках и поверхностных, результаты работы одномерной гидродинамической модели (уровни и расходы воды в каналах) и т.д. Для наглядного представления полученных характеристик были созданы 65 контрольных точек, в которые извлекались необходимые данные и осреднялись за вегетационный период.

Результаты. Для каждого пятилетнего периода были получены изолинии УБВ, отражающие среднюю глубину поверхности грунтовых вод за 5 вегетационных периодов – например, на рис. 2 представлены изолинии для вегетационных периодов 2045-2050 гг (сценарий без перемычек и с перемычками).

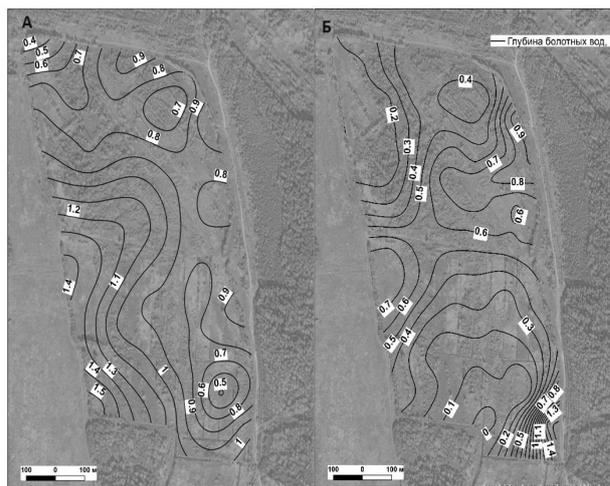


Рис. 2. Изолинии средней глубины болотных вод за вегетационные периоды 2045-2050 гг при двух сценариях: А – без перемычек на каналах, Б – с перемычками.

Расчёт показал, что при установке перемычек поменяются не только сами значения глубин болотных вод, но и их пространственное распределение: значительно повышается УБВ в южной

части болота; наиболее глубокое залегание горизонта болотных вод наблюдается в западной и северо-восточной частях болота; форма и направление изолиний значительно поменяется при построении перемычек в южной части – с севера на юг УБВ повышается при проектом сценарии, в то время, как при современном состоянии каналов, он понижается с северо-запада на юго-восток. Влажность в верхнем слое торфа при проектом варианте блокировки каналов остается достаточно стабильной круглый год и составляет порядка 50-60%.

Выводы. Модель MIKE SHE позволяет при условии использования широкого перечня характеристик водного режима, растительного покрова и торфяной залежи провести прогнозные ступенчатое моделирование уровня болотных вод и влажности поверхностных горизонтов почвы при различных сценариях регулирования стока болотных вод путем изменения пропускной способности дренажной сети.

Модель также позволяет реализовать пространственное планирование различных заданных уровней болотных вод по требованию концепции.

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).

The research was carried out as part of the most important innovative project of national importance «Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in the territory of the Russian Federation, ensuring the creation of recording data systems on the fluxes of climate-active substances and the carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems» (Registration number: 123030300031-6).

Компания ООО «ЭКХАЙДЕН» обеспечила техническую поддержку при использовании комплекса MIKE SHE для целей данного проекта.

1. Отчет о научно-исследовательской работе по проекту: «ОБСЛЕДОВАНИЕ НАРУШЕННЫХ ТОРФЯНЫХ БОЛОТ НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «УГРА» С ЦЕЛЬЮ ВОССТАНОВЛЕНИЯ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ», Калуга – 2017;
2. Cirulis A., Jansons E., Java O., Lapans A. Comparison of Peatland Hydrological Models // Rural Development 2019, 2022. Т. 2021. № 1. P. 65-72.;
3. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F. et al. // Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.;
4. Sirin A., Medvedeva M., Korotkov V., Itkin V., Minayeva T., Ilyasov D., Suvorov G., Joosten H. Addressing Peatland Rewetting in Russian Federation Climate Reporting // Land. 2021. 10. 1200. 10.3390/land10111200.

ТУНДРОВЫЕ ОЗЁРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ПОТОКИ МЕТАНА, СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

TUNDRA LAKES OF WESTERN SIBERIA: METHANE FLUXES, CARBON CONTENT IN BOTTOM SEDIMENTS

Л.Л. Голубятников¹, Е.А. Заров²

L.L. Golubyatnikov¹, E.A. Zarov²

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (г. Москва, Россия)

² Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

E-mail: golub@ifaran.ru

Озера оказывают существенное влияние на глобальный и региональные циклы углерода (Johnson et al., 2022). В донных отложениях озер происходит накопление органического вещества, в результате этого процесса часть атмосферного углерода выводится из глобального круговорота. В то же время озера являются одним из основных природных источников атмосферного метана. Глобальная эмиссия метана из озер составляет 24–27% эмиссии метана из природных источников (Stavert et al., 2022). Интенсивность потока метана из озер в атмосферу существенно зависит от количества органического вещества в донных отложениях водоема и от физико-химических свойств водной толщи озер (Гальченко, 2001). В последние годы большое внимание уделяется изучению газообмена между атмосферой и озерами в субполярных регионах суши (Голубятников, Маммарелла, 2018; Kyzivat, Smith, 2023). В настоящем исследовании проанализированы экспериментальные данные о потоках метана в атмосферу с поверхности тундровых озер Западной Сибири и оценено содержание органического углерода в донных осадках исследуемых озер.

Полевые исследования проводились в летние сезоны 2013–2017 годов на водораздельном участке рек Пур и Таз, примерно в 20 км на юго-запад от поселка Тазовский (Ямало-Ненецкий автономный округ). Территория находится в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Для изучаемой тундровой территории Западной Сибири характерен континентальный климат с коротким и прохладным летним периодом и длинным и холодным зимним периодом: среднегодовая температура воздуха составляет -6.5°C , количество годовых осадков около 570 мм, сумма положительных температур 1320°C , вегетационный период продолжается около 100 дней. Средняя температура января составляет -25.4°C , июля – $+15.4^{\circ}\text{C}$ (Заров и др., 2022). Были исследованы типичные для северной части За-

падной Сибири термокарстовые озера, площадь зеркала которых составляла от 1000 м^2 до 1.5 км^2 , глубина – 0.5–2.5 м, донные отложения – песочно-иловые, сапропелевые или торфяные.

Измерения потоков метана на озерах проводились методом статических камер. Использовались затемненные пластиковые камеры размером $30\times 40\times 40$ см, которые удерживались на поверхности воды с помощью поплавков. Время от установки камеры до отбора последней пробы воздуха составляло 30 минут, в течение которого отбиралось четыре пробы камерного воздуха с промежутком в 10 минут. Анализ концентрации метана в отобранных пробах проводился на хроматографе «Кристалл-5000.2», оснащенный пламенно-ионизационным детектором. Удельный поток метана рассчитывался методом линейной регрессии с весами. Образцы донных отложений были отобраны на трех озерах. В лаборатории проводился анализ содержания органического углерода в отобранных образцах на элементном анализаторе EuroVector EA-3000.

Анализ экспериментальных данных показал, что с поверхности исследованных тундровых озер значения потока метана в атмосферу изменялись от $0.02\text{ мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ до $18.3\text{ мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ с медианой $0.85\text{ мгCH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$. Песочно-иловые и сапропелевые донные отложения исследованных озер содержат от 1% до 20% органического углерода. Содержание органического углерода в торфяных донных отложениях составляет от 30% до 42%. Тундровые озера, донные отложения которых насыщены органическим веществом, являются интенсивными источниками атмосферного метана. Анализ значений удельной электропроводности и водородного показателя воды исследованных озер указывает на неблагоприятные условия для существования микроорганизмов, окисляющих метан в водной толще, что согласуется с ранее полученными результатами (Голубятников, Казанцев, 2013; Заров и др., 2022).

Оценки значений потоков метана с поверхности озер в атмосферу получены на основе измерений в основном диффузионных потоков метана из озер. По этой причине, полученные оценки интенсивности выделения метана из озер в атмосферу следует рассматривать как нижнюю границу этой величины для водоемов исследуемого региона.

Климатические изменения, происходящие в высоких широтах северного полушария, привели к сокращению периода ледостава на тундро-

вых озерах, к повышению интенсивностей биогеохимических процессов в водной толще и донных отложениях этих озер (Jansen et al. 2022). Учитывая тенденцию к возрастанию эмиссии метана с зеркала северных озер при уменьшении продолжительности периода ледостава на них (Wik et al., 2016), вероятно повышение интенсивности потока метана в атмосферу из озерной сети рассматриваемого региона при дальнейшем потеплении климата субарктического региона.

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) и Государственного задания «Моделирование влияния изменений климата на экологические процессы и системы» (рег. № 1021032424681-6).

1. Гальченко В.Ф. 2001. Метанотрофные бактерии. М.: ГЕОС. 500 с.
2. Голубятников Л.Л., Казанцев В.С. 2013. Вклад тундровых озер Западной Сибири в метановый бюджет атмосферы. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 49. № 4. С. 324-333.
3. Голубятников Л.Л., Маммарелла И. 2018. Потоки метана в атмосферу из озер Фенноскандии. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т.54. №6. С. 672-683.
4. Заров Е.А., Голубятников Л.Л., Лапшина Е.Д., Лойко С.В. 2022. Растительность и почвы тундровых ландшафтов Пур-Тазовского междуречья. Изв. РАН, серия биологическая. №1, с. 82-92.
5. Jansen J., Woolway R. I., Kraemer B. M. et al. 2022. Global increase in methane production under future warming of lake bottom waters. *Global Change Biology*. Vol. 28, p. 5427–5440.
6. Johnson M. S., Matthews E., Du J. et al. 2022. Methane emission from global lakes: New spatiotemporal data and observation-driven modeling of methane dynamics indicates lower emissions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. Vol. 127, e2022JG006793.
7. Kyzivat E. D., Smith L. C. 2023. A closer look at the effects of lake area, aquatic vegetation, and double-counted wetlands on pan-Arctic lake methane emissions estimates. *Geophysical Research Letters*. Vol. 50, e2023GL104825.
8. Stavert A. R., Saunio M., Canadell J. G. et al. 2022. Regional trends and drivers of the global methane budget. *Global Change Biology*. Vol. 28(1), p. 182–200.
9. Wik M., Varner R.K., Walter Anthony K. et al. 2016. Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release. *Nature Geoscience*. Vol. 9. P. 99-105.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА БОЛОТ ТУНДРОВОЙ И ЛЕСОТУНДРОВОЙ ЗОНЫ РОССИИ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА

MODELLING THE CARBON TURNOVER DYNAMICS FOR PEATLANDS OF RUSSIAN TUNDRA AND FOREST-TUNDRA ZONE UNDER ACTUAL AND PROGNOSTIC CLIMATE CHANGE

Н.Н. Завалишин¹, Л.Л. Голубятников¹, Г.Г. Александров¹

¹ ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (г. Москва, Россия)
E-mail: nickolos@ifaran.ru

Усиленное по сравнению с другими территориями потепление климата в арктической зоне России требует исследовать реакцию на них тундровых и лесотундровых экосистем, занимающих ее основную площадь. Недостаток измерений компонентов круговорота углерода на обширных северных территориях с холодным климатом порождает необходимость математического моделирования как современных значений запасов и потоков углерода, так и их прогнозных величин при вероятных изменениях климата в будущем. С целью оценки масштабов углеродного обмена в системе атмосфера-суша для болотных экосистем тундровой и лесотундровой зоны России построена трехкомпонентная динамическая модель углеродного цикла, пулами которой являются содержания углерода в живой фитомассе (C_1), в мертвой фитомассе (подстилка, мертвые корни, дебрис) (C_2), в органическом веществе почвы (гумусовые вещества) (C_3) (рис. 1). Источником данных по круговороту в опорной экосистеме круговорота углерода в мохово-кустарничковой тундре (рис. 1) является статическая схема из работы (Базилевич и Гильманов, 1985). Животные-потребители фитомассы и организмы-деструкторы мертвого органического вещества отнесены к окружающей среде. Пул полной фитомассы C_1 поглощает углекислый газ атмосферы (C_a) в ходе фотосинтеза, выделяет его в ходе автотрофного дыхания, и их разность составляет чистую первичную продукцию (NPP). Она распределяется между приростом фитомассы, поглощением и отчуждением её растительными животными (выходной поток y_1), опадом и отпадом (поток f_{12}). Выходные потоки пула мертвой фитомассы C_2 состоят из гетеротрофного дыхания (y_{21}) и экспорта в соседние экосистемы (y_{22}). Посредством потока f_{23} обеспечивается

транспорт органики из органических остатков разных типов в гумусовые соединения C_3 . Поток q_2 обозначает пополнение содержания углерода в резервуаре мертвой фитомассы за счет выпадения из атмосферы и переноса из соседних экосистем. Аналогично для пула органического вещества почвы. Опад и отпад (f_{12}), гетеротрофное дыхание (y_{21} , y_{31}), потребление и отчуждение фитомассы животными (y_1), экспорт в соседние экосистемы со стоком (y_{22} , y_{32}), транспорт углерода из органических остатков в гумусовые вещества (f_{23}) являются донорными потоками (зависят от посылающих запасов): $f_{12} = \alpha_{12} C_1$, $f_{23} = \alpha_{23} C_2$, $y_1 = m_1 C_1$, $y_{22} = m_2 C_2$, $y_{32} = m_3 C_3$, где коэффициенты могут зависеть от факторов окружающей среды или хозяйственного воздействия. Функция продуктивности растительного покрова учитывает влияние количества фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), среднегодовой температуры приземного воздуха, годовой суммы осадков. По запасу углерода в фитомассе она нелинейна. Потоки гетеротрофного дыхания зависят не только от среднегодовой приземной температуры воздуха, но и от количества осадков. Зависимость от температуры опирается на экспоненциальное уравнение Аррениуса, а для осадков взят вариант с насыщением (модель Райха-Поттера). Поскольку полный углеродный баланс измерен или оценен только в отдельных немногочисленных географических точках, для нахождения недостающих значений потоков используется условие равновесия в начальный момент времени.

Результатом выбора потоковых зависимостей является трех-компарментальная динамическая модель круговорота углерода для каждой пространственной ячейки тундровой и лесотундровой зоны:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= C_1 \frac{p_0}{1+p_1 C_1} \frac{k_1(T_a - T_{min})(T_{max} - T_a)}{(T_{max} - T_{min})^2} C_a k_p (1 - \exp(-\beta_P P))(1 - \exp(-\beta_R Q_R)) - (m_1 + \alpha_{12}) C_1 \frac{dC_2}{dt} = q_2 + \alpha_{12} C_1 - \\ m_2 C_2 - \alpha_{23} C_2 - k_2^D C_2 \exp(k_2^D T_a) / (k_2^D + P) \frac{dC_3}{dt} &= q_3 - m_3 C_3 + \alpha_{23} C_2 - k_3^D C_3 \exp(k_3^D T_a) / (k_3^D + P) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

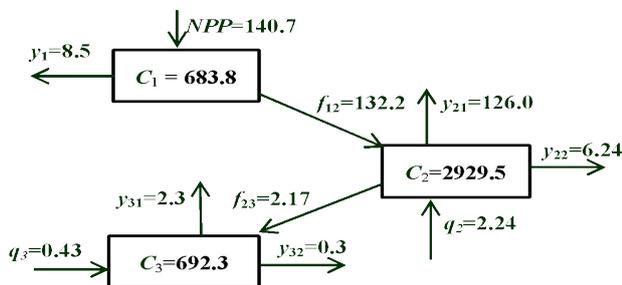


Рисунок 1. Агрегированная до трех пулов статическая схема круговорота углерода в мохово-кустарничковой тундре п-ова Таймыр (Базилевич и Гильманов, 1985) (пулы – гС/м², потоки – гС/м²/год)

Точечная модель круговорота углерода типа (1) строится для каждой ячейки на пространственной сетке с разрешением 0.5°x0.5° по широте и долготе, преимущественно занятой болотами согласно карте растительности (Базилевич,

1993). В качестве начального принимается момент времени 1980 г., соответствующий мало-нарушенному состоянию экосистем, затем модель численно интегрируется в каждой ячейке пространства до 2015 г. по климатическим данным ре-анализа ERA-5, а далее до 2100 г. по проекциям глобальных климатических моделей IPSL и MPI для среднегодовой приземной температуры воздуха, годовых сумм осадков, суммарной солнечной радиации, преобразованной к ФАР, минимальной и максимальной температур приземного воздуха со сценариями антропогенных выбросов SSP-2.6 и SSP-5.85. В ходе имитационных компьютерных расчетов вычислены как меридиональные, так и широтные распределения фитомассы, мортмассы, гумусовых веществ почвы, потоков первичной продуктивности и гетеротрофного дыхания, а также динамика этих величин в каждой пространственной ячейке.

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).

1. Базилевич Н.И., Гильманов Т.Г., Концептуально-балансовые модели экосистем как этап обобщения экологической информации при построении математических моделей. // в сб. «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем», т. VII, Л., Гидрометеоиздат, 1985, с. 152-178.
2. Базилевич Н.И., Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М., Наука, 1993.

ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ И ЮЖНОТУНДРОВОЙ ЗОН ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

METHANE EMISSION FROM OLIGOTROPHIC FANS IN THE MIDDLE TAIGA AND SOUTHERN TUNDRA ZONES OF WESTERN SIBERIA

А.В. Ларина, Л.А. Кривенок, В.С. Казанцев

A.V. Larina, L.A. Krivenok, V.S. Kazantsev

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова (г. Москва, Россия)

E-mail: larin.arina2003@gmail.com

Происходящий в последние десятилетия нагрев нижних слоев атмосферы, ведущий к изменению климатических условий Земли, связывают с ростом эмиссии парниковых газов (H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3) (ПГ). Накапливаясь в атмосфере, они не пропускают часть отраженного землей солнечного излучения в ИК (инфракрасном) спектре. CH_4 – единственный ПГ, чья антропогенная эмиссия превышает естественную, в тоже время, его глобальная эмиссия от природных источников оценивается со значительной неопределенностью. Так оценка вклада одного из важнейших естественных источников метана – болот и заболоченных земель варьируется в диапазоне 102–182 Мт CH_4 /год (IPCC, 2021). Болота Западной Сибири (ЗС) занимают не только 1/3 территории региона (Peregón et al., 2008), но и составляют 1/10 площади болот мира (Терентьева и др., 2020).

Данное исследование посвящено оценке удельных потоков метана (УПМ) с поверхности олиготрофных болот в Западной Сибири. Объектами исследования стали грядово-мочажинный болотный комплекс (ГМК) в среднетаежной подзоне (стационар «Мухрино», 60°53'20" с.ш., 68°42'10" в.д.) и плоскобугристо-мочажинный комплекс (ПБМК) в Тазовской тундре (67°22'23.3" с.ш., 78°37'37.4" в.д.). В задачи исследования входило:

Измерение удельных потоков метана (УПМ) методом статических камер с различных элементов микроландшафта олиготрофных болот;

Изучение однородности УПМ со схожих элементов микроландшафта;

Оценка связи между УПМ и условиями среды (температурой воздуха, почвы на разных глубинах, уровнем болотных вод (УБВ));

Сравнение величин УПМ и их связи с внешними факторами для объектов в двух подзонах ЗС.

Измерение на обоих типах болотных комплексов велось для следующих элементов ми-

кроландшафта: гряд – микроповышений с аэробными условиями в верхней части профиля (от 30 см); мочажин – микропонижений с преобладанием анаэробных условий. На ПБМК измерение дополнительно было произведено на морозобойной трещине и древнем хасырее.

В исследовании применялся метод статических камер (Глаголев, 2010, 2011). Экспозиция составляла от 30 до 60 минут в зависимости от степени увлажненности участка, измерения на точках производились одновременно двумя камерами. Газ отбирался в пенициллиновые флаконы, заполненные насыщенным раствором NaCl, для герметизации пробы. Фиксация температуры воздуха и атмосферного давления велась портативной метеостанции Kestrel 5000, для регистрации температуры почвы использовались датчики «Thermochron iButton», установленные на глубинах от 0 до 50 см. Уровень болотных вод измерялся от поверхности мха, положительное и отрицательное значение характеризовали залегание вод глубже мха и его затопление, соответственно. Анализ проб осуществлялся на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором. Для расчета УПМ использовалась программа MSExcel.

В средней тайге в течении периода измерений точки пробоотбора не менялись, соответственно имела только динамика во времени, в южной тайге точки менялись ежедневно для оценки площадной динамики (табл. 1). С целью обобщения результатов, полученных на ПБМК, значения для гряд, необводненных (УБВ<16 см) и обводненных (УБВ>16 см) мочажин (включая хасырей и морозобойную трещину), измеренных на разных точках, были объединены в выборки для соответствующих элементов микроландшафта. Вариация внутри них обусловлена континуальностью объекта исследования, затрудняющей разделение на категории.

Таблица 1. Величины УПМ характерные для различных точек исследования

Комплекс	Микро-ландшафт	УБВ, см	Число УПМ	УПМ, мгСН ₄ м ⁻² ч ⁻¹	
				Медиана	Среднее
ГМК (Средняя Тайга)	Г	-	45	0.051	0.057
НМ	4 – 10.5	48	11.48	14.43	
ОМ	-1 – 3	87	6.12	6.08	
ПбМК _{ср}					
(Южная Тундра)	Г _{ср}	-	62	0.008	-0.002
НМ _{ср}	16-27	46	1.63	1.40	
ОМ _{ср}	-9 – 16	76	4.77	5.08	

Удельные потоки СН₄ (рис.1) на грядах слабо варьируются около нуля, что связано с аэробными условиями благоприятными для метанотрофов, принадлежность объекта изучения к той или иной природной зоне не оказывает значительного влияния. На обводненных мочажинах УПМ для ГМК и ПбМК имеют сопоставимые величины, с медианой около 5-6 мгСН₄м⁻²ч⁻¹. Основное различие обусловлено эмиссией с необводненных мочажин. Среднее значение величины УПМ в южнотундровой и среднетаежной подзоне отличается на порядок, 1.40 и 14.43 мгСН₄м⁻²ч⁻¹, соответственно. Однако, вероятно, что низкая величина УПМ на обводненной мочажине ГМК ассоциирована с нехваткой доступного для метаногенов субстрата для продукции большего объема метана.

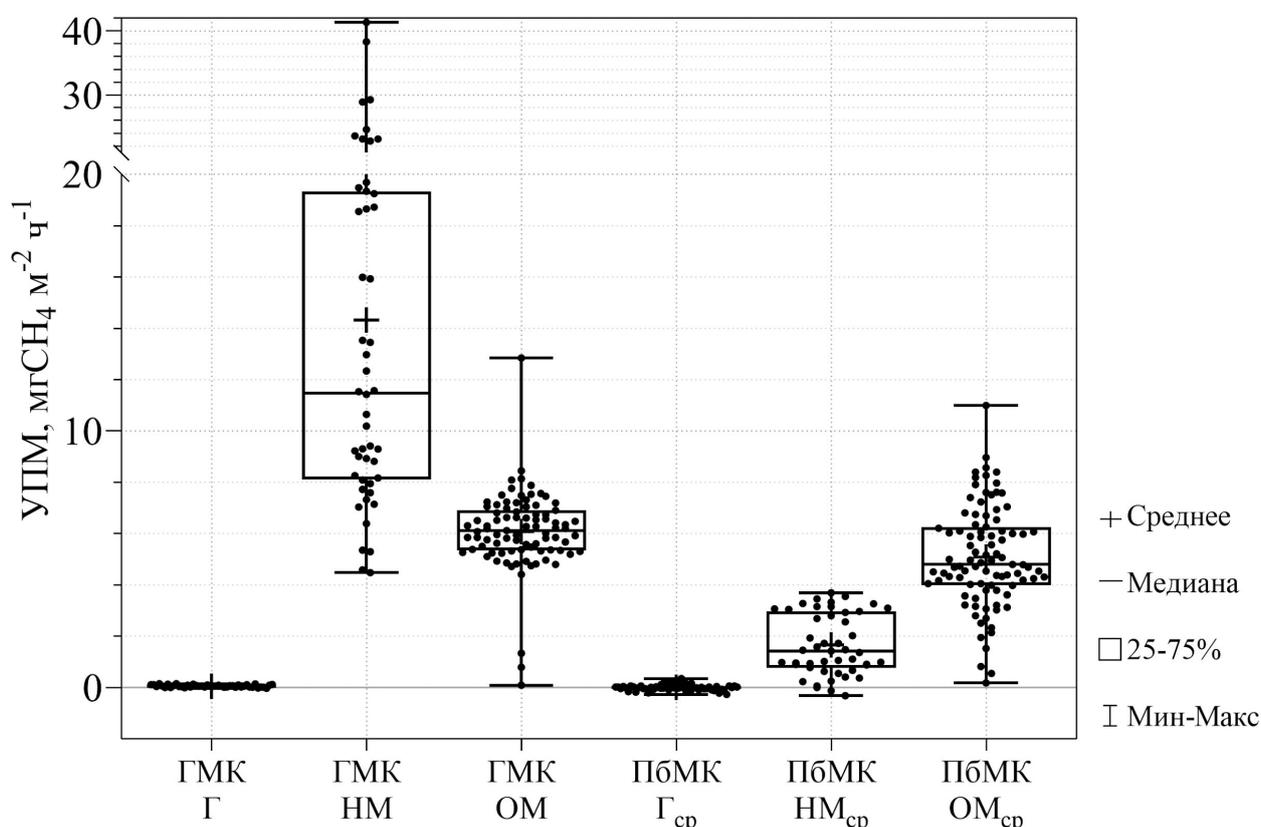


Рисунок. 1 Диаграммы размаха для УПМ.

Для определения взаимосвязи между УПМ и факторами внешней среды (уровнем болотных вод, температурой воздуха, и почвы на глубинах 0 см; 5 см; 10-15 см; 15-25 см; 25-35 см; >35 см) произведен корреляционный анализ. Ввиду того, что распределение полученных значений не соответствует нормальному – был выбран корреляционный анализ Спирмена (табл. 2). По его результатам, для гряд на ГМК не выявлено наличие связи, ввиду неблагоприятных для метаногенов аэробных условий в верхней части

профиля. Наличие обратной связи для гряд на ПбМК может объясняться благотворным действием на метанотрофов, снижающих поток метана из толщи торфа. Наибольший уровень корреляций, как с температурой, так и с влажностью, наблюдается на обводненной мочажине в тайге и на необводненной – в тундре. Для необводненной мочажин на ГМК значимая связь наблюдается только с температурой воздуха. Интересно, что при исследовании УПМ на ПбМК наблюдалось наличие обратной связи (-0.27 – -0.56) между

УПМ и температурой почвы на разных глубинах для мочажин, что может быть связано с влиянием других факторов, ввиду объединения группы точек. Однако, достоверное объяснение этого

факта требует дополнительного микробиологического анализа. Наличие связи УПМ с УБВ на мочажинах связано с созданием благоприятных для метаногенов анаэробных условий.

Таблица 2. Анализ Спирмена для выявления корреляции между УПМ и параметрами внешней среды

Комплекс	Микро-ландшафт	t°C воздуха	t°C почв						УБВ
			0 см	5 см	10-15 см	15-25 см	25-35 см	>35 см	
ГМК (Средняя Тайга)	Г	0.02	0.11	0.11	0.03	-0.04	0.08	-	-
НМ	0.48	0.38	0.34	-0.01	-0.18	-0.28	-	0.03	
ОМ	0.52	0.63	0.71	0.60	0.57	-	-	-0.64	
ПБМКср (Южная Тундра)	Гср	-0.33	-0.40	-0.29	-0,07	-0.29	0.50	-	-
НМср	0.41	-0.31	0.38	0.33	0.77	0.32	-	-0.44	
ОМср	0.08	-0.27	0.09	-0.03	-0.42	-0.43	-0.56	-0.28	

Таким образом, оценка величины эмиссии с поверхности олиготрофного болота позволила выявить неоднородность УПМ, ассоциированную с варьированием условий температуры и влажности. Величина УПМ имеет прямую связь с уровнем влажности в верхней части профиля, изменяясь от слабо отрицательных величин собственных сухим элементам микроландшафта до 10–40 мгСН₄м⁻²ч⁻¹ на увлажненных.

Наименьшая величина корреляционных связей между УПМ и фактором внешней среды, характерна для гряд, на мочажинных связи более выражены, особенно с УБВ. Различия между величинами УПМ в средней тайге и южной тундре обусловлено высокой эмиссией на необводненных или низкой на обводненных мочажинах ГМК. Корреляционные связи выражены на разных элементах микроландшафта болот в разной степени.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 22-47-04408 «Потоки и изотопный состав метана над неоднородными ландшафтами вечной мерзлоты в Арктике и торфяных болот в Сибири» и Госзадания ИФА РАН 1022030400001-9 «Мониторинг и анализ динамики эмиссии парниковых газов из наземных и пресноводных экосистем арктической зоны России».

1. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Методы измерения газообмена на границе почва/атмосфера. – 2010.
2. Глаголев М.В., Филиппов И.В. Измерение потоков парниковых газов в болотных экосистемах. – 2011.
3. Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максюттов Ш.Ш. Картографирование таежных болот западной Сибири на основе дистанционной информации // Изв. РАН. География. 2020. Т. 84. № 6. С. 920–930.
4. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA, 2391 pp.
5. Peregón A., Maksyutov S., Yamagata Y., An image-based inventory of the spatial structure of West Siberian wetlands // Environ. Res. Lett. 4. 2009. 6 pp.

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ CO₂ НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА «СТАРОСЕЛЬСКИЙ МОХ»

DIRECT AND INVERSE PROBLEMS OF CO₂ FLUXES MODELLING ON THE EXAMPLE OF «STAROSELSKIY MOKH» PEATLAND

*Ю.В. Мухартова¹, А.В. Ольчев¹, А.Ф. Сogaчев², Ю.А. Курбатова², В.М. Степаненко³
I.V. Mukhartova¹, A.V. Olchev¹, A.F. Sogachev², J.A. Kurbatova², V.M. Stepanenko³*

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

² Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (г. Москва, Россия)

³ Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

E-mail: muhartova@yandex.ru

Наблюдаемый с середины двадцатого века рост глобальной температуры и изменение режима осадков большинством экспертов по изменению климата (IPCC, 2013) связывается с ростом содержания парниковых газов в атмосфере (в первую очередь, диоксида углерода CO₂). Надежная информация о потоках CO₂ и других парниковых газов в разных типах растительных сообществ является чрезвычайно важной для понимания современных климатических тенденций и прогноза будущих климатических изменений. Основными методами измерения потоков парниковых газов являются метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) (Burba, 2013) и экспозиционных камер (Olchev et al., 2013). Для корректной работы метода турбулентных пульсаций требуется горизонтальная однородность подстилающей поверхности, а также пренебрежимо малая горизонтальная дивергенция и конвергенция потоков, что ограничивает применение данного метода в условиях неоднородных ландшафтов со сложным рельефом и мозаичной растительностью. Для получения информации о пространственной неоднородности потоков методом экспозиционных камер необходимо проведение измерений в большом количестве точек почти одновременно (за небольшой промежуток времени), что также может представлять техническую сложность. Одной из наименее изученных природных экосистем в отношении роли и вклада в глобальный углеродный баланс являются болота. Аккумулируя значительное количество углерода и воды, болота активно воздействуют на углеродный, тепловой и водный баланс земной поверхности (Olchev et al., 2013). Прямые измерения потоков в подобных экосистемах, имеющих значительную пространственную неоднородность растительного

покрова, зачастую ограничены или даже невозможны. Дополнение измерений математическим моделированием с использованием прямых и обратных моделей различной степени сложности может быть весьма продуктивным в такой ситуации. Данная работа посвящена разработке и тестированию на примере расположенного в Тверской области болота «Старосельский мох» прямой и обратной задачи оценки потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью. Прямая модель оценки потоков над поверхностью основана на численном решении задачи для уравнения диффузии-реакции-адвекции для концентрации парникового газа (Mukhartova et al., 2024). По найденному распределению концентрации можно оценить вертикальный поток. Основным недостатком прямой задачи является необходимость знания распределения почвенного потока и ряда параметров в параметризации скорости дыхания и фотосинтеза, связанных с конкретным типом растительности. При отсутствии такой информации возможно использовать обратную модель, если провести дистанционное измерение концентрации парникового газа на нескольких (по крайней мере двух) уровнях над поверхностью. Такие измерения возможны, например, с помощью газоанализаторов, размещенных на дронах. Обратная задача в таком случае сводится к многократному решению прямой задачи в области выше растительного покрова с направленно изменяющимся вертикальным потоком на нужном уровне h_{flux} . При этом поток находится из условия минимума нормы разности модельных и измеренных значений концентрации. Для проверки репрезентативности предложенной модели проведен ряд расчетов потоков CO₂ на различных участках болота «Старосельский мох».

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-55.

1. Burba, G. 2013. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. – Lincoln, Nebraska: LI-COR Biosciences.
2. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 1535 p.
3. Mukhartova, I.V.; Olchev, A.V.; Gibadullin, R.R.; Lukyanenko, D.V.; Makmudova, L.Sh.; Kerimov I.A. 2024. Inverse problem for retrieving greenhouse gas fluxes at the non-uniform underlying surface from measurements of their concentrations at several levels. *Journal of Physics: Conference Series*. 2701(2024) 012141. Doi: 10.1088/1742-6596/2701/012141
4. Olchev A., Volkova E., Karataeva T., Novenko E. 2013. Growing season variability of net ecosystem CO₂ exchange and evapotranspiration of a sphagnum mire in the broad-leaved forest zone of European Russia. *Environmental Research Letters*. Vol. 8 (3). P.035051

ОЦЕНКА ПОТОКОВ МЕТАНА С БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МОДЕЛИ TERM

ESTIMATION OF METHANE FLUXES FROM WETLAND ECOSYSTEMS FOR THE TERRITORY OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA BASED ON THE RESULTS OF NUMERICAL EXPERIMENTS OF THE TERM MODEL

A. A. Рязанова^{1, 2}, В. Ю. Богомолов^{1, 2, 3}, Е. А. Дюкарев^{1, 2, 4}
A.A. Ryazanova^{1, 2}, V.Yu. Bogomolov^{1, 2, 3}, E.A. Dyukarev^{1, 2, 4}.

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

² Институт физики атмосферы РАН (г. Москва, Россия)

³ Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

⁴ Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

Email: raa@scert.ru

Болотные экосистемы юга Западной Сибири занимают около 30% её территории, местами в лесной зоне заболоченность достигает 80% (лесоболотная зона). На этой территории находится самое большое болото в мире – Васюганское, его площадь достигает 53 тыс. км². Известно, что по содержанию устойчивого углерода почвы болотные экосистемы стоят на первом месте, поэтому они играют важную роль в круговороте углерода (Заварзин, 1994). В зависимости от температуры у поверхности болота, его рельефа и влажности почвы интенсивность поглощения углекислого газа и выделения метана меняется. В работе (Chechin, D.G. et al, 2024) описывается, что в зависимости от микроландшафтов болота (рям – возвышенные участки, гряды – кочки, поросшие мхом, мочажины – низменные переувлажненные места) отличается как температура у поверхности болота, так и эмиссии метана с них. Эмиссии с возвышенностей в 150 раз ниже чем на мочажинах. Поэтому при моделировании потоков метана следует учитывать пространственную неоднородность рельефа на болотах.

Для моделирования потоков метана с болотных экосистем территории юга Западной Сибири использовалась модель деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ (TerM) (Лыкосов и др., 1978; Травова и др., 2022). Эта модель представляет собой одномерную реализацию теплопереноса в почве совместно с радиационным и тепловым балансом поверхности, согласован-

ным с блоком растительности, блоком расчета турбулентных потоков с поверхности, блоками эмиссии компонент углеродного баланса и т.д. В самой почве реализована параметризация уровня грунтовых вод с горизонтальным градиентным стоком, которая воспроизводит некоторый средний для ячейки уровень колебания грунтовых вод как функции от осадков, испарения и горизонтального переноса. Для воспроизведения эмиссии метана с поверхности описываемых ландшафтов используется модель Мартина Хаймана (Walter, B. P., and Heimann, M., 2000). Калибровка модели проводилась на одномерных расчетах с использованием данных измерений (атмосферный форсинг, свойства почвы). В качестве тестовой площадки был выбран полигон Мухрино. Первая площадка на нем – мочажина, когда уровень грунтовых вод достигает поверхности, вторая – гряда с кустарниками, где уровень грунтовых вод колеблется от 15 до 30 см от поверхности. Эти площадки отличаются между собой как свойствами почвы, так и подстилающей поверхностью. На рисунках 1 и 2 представлены результаты численных экспериментов в сравнении с данными измерений для этих площадок.

Здесь видно, что модель неплохо воспроизводит динамику температуры на 5 см, но занижает её на 20 см. Это может быть объяснено тем, что в настоящее время в модели в качестве типа растительности для этого эксперимента задавался травяной покров, а не мох, который не затеняет потоки солнечной радиации.

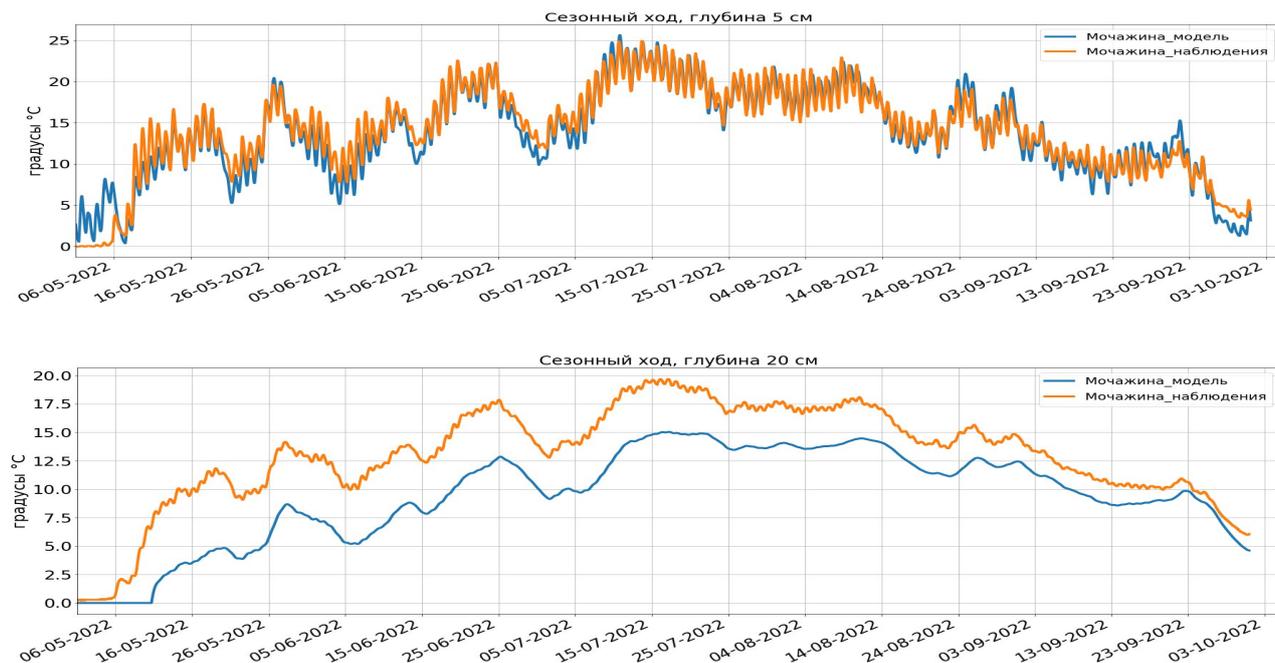


Рисунок 1. Температурный режим ландшафта «мочажина» по данным моделирования и наблюдений на глубине 5, 20 см.

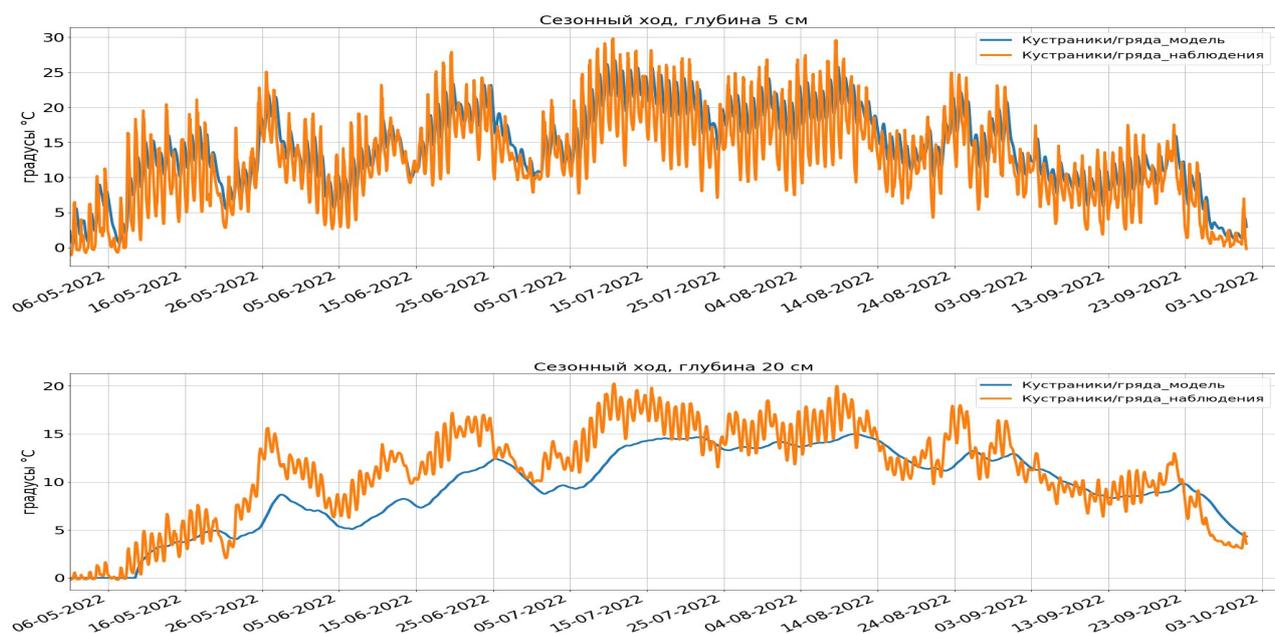


Рисунок 2. Температурный режим ландшафта «кустарники/гряда» по данным моделирования и наблюдений на глубине 5, 20 см.

В случае с типом поверхности гряда видна лучшая согласованность моделируемой температуры с данными измерений. Это может быть объяснено тем, описание теплового и радиационного баланса для типа растительности кустарники достаточно точно воспроизводится в модели.

После калибровки модели и выполнения тестовых экспериментов были рассчитаны потоки метана для этих двух площадок (рисунок 3).

Здесь видно, что поток метана с мочажины в несколько раз превосходит поток метана гряды, что согласуется с данными измерений и результатами, представленными в статье (Chechin, D.G. et al, 2024). Отсюда можно сделать вывод при моделировании потоков метана действительно важен учет локальной неоднородной поверхности болот.

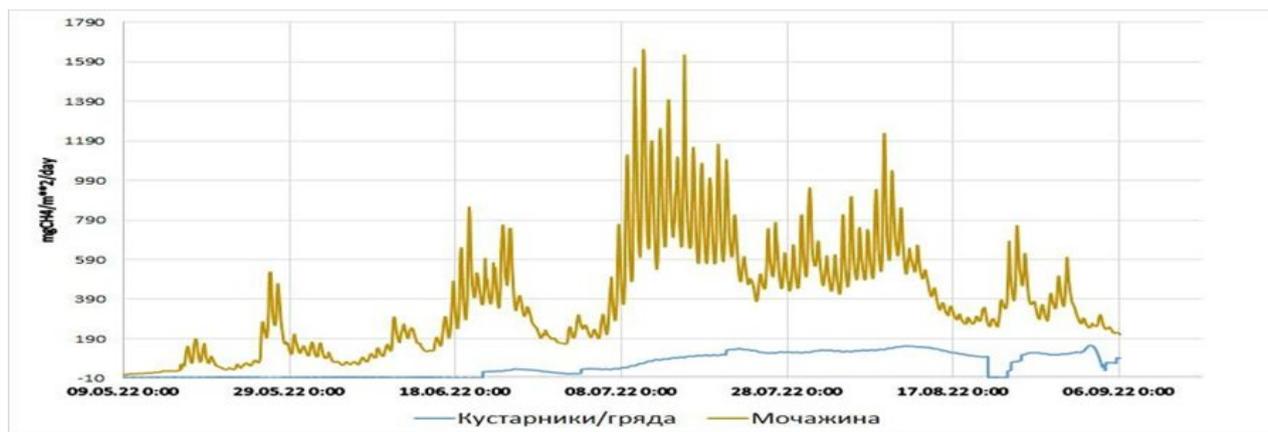


Рисунок 3. Поток метана по данным моделирования для различных ландшафтов торфяных болот (кустарники/грязь, мочажина) за теплый период 2021 и 2022 годов.

Следующим этапом работ является проведение модельных экспериментов для всей территории юга Западной Сибири, результатом кото-

рых будут интегральные оценки потоков метана с болот для всех его микроландшафтов (рям, грязь и мочажина).

1. Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России. 1994 Природа №7, с. 15-18.
2. Лыкосов В.Н., Палагин Э.Г. Динамика взаимосвязанного переноса тепла и влаги в системе атмосфера-почва. // Метеорология и гидрология. 1978. №8. С. 48–56.
3. Травова С.В., Степаненко В.М., Медведев А.И., Толстых М.А., Богомолов В.Ю. Качество воспроизведения состояния почвы моделью деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ в составе модели прогноза погоды ПЛАВ. // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 5–24. <http://dx.doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-5-24>.
4. Chechin, D.G.; Repina, I.A.; Artamonov, A.Y.; Drozd, I.D.; Dyukarev, E.A.; Kazantsev, V.S.; Krivenok, L.A.; Larina, A.V.; Pashkin, A.D.; Shmonin, K.N.; et al. Quantifying Spatial Heterogeneities of Surface Heat Budget and Methane Emissions over West-Siberian Peatland: Highlights from the Mukhrino 2022 Campaign. *Forests* 2024, 15, 102. <https://doi.org/10.3390/f15010102>
5. Walter, B.P., and M. Heimann, 2000: A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 14, 745-765, doi:10.1029/1999GB001204.

АНАЭРОБНОЕ ОКИСЛЕНИЕ И АЦЕТОКЛАСТИЧЕСКИЙ МЕТАНОГЕНЕЗ – КЛЮЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ ЦИКЛА МЕТАНА В ГЛУБИННЫХ СЛОЯХ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ

ANAEROBIC OXIDATION AND ACETOCLASTIC METHANOGENESIS ARE KEY PROCESSES OF METHANE CYCLE IN DEEPER LAYERS OF RAISED BOGS

А.Ф. Сабреков¹, М.В. Семенов², И.Е. Терентьева³, М.В. Глаголев^{1,4}, Ю.В. Лумму⁵
A.F. Sabrekov¹, M.V. Semenov², I.E. Terentieva³, M.V. Glagolev^{1,4}, Yu.V. Litti⁵

¹ Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

² Лаборатория Почвенного углерода и микробной экологии, ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия)

³ Факультет Искусств, университет Калгари (г. Калгари, Канада)

⁴ Факультет Почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

⁵ Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН (г. Москва, Россия)

E-mail: sabrekovaf@gmail.com

Бореальные болота содержат около 500 Пг углерода, что эквивалентно примерно 30% почвенного углерода на Земле (Yu, 2012). Хотя продукция двух главных парниковых газов – углекислого газа и метана – активнее всего протекает в верхнем слое торфа (глубиной <50 см), большая часть углерода сосредоточена в более глубоких слоях болот (Yu, 2012). Быстрый рост температуры воздуха в высоких широтах может привести к ускорению разложения органики в этих глубинных слоях, а значит и к увеличению эмиссии углекислого газа и метана из болот в целом. Таким образом, понимание биогеохимических процессов разложения торфа в этих слоях необходимо для эффективного прогнозирования климата.

Устойчивость торфяной органики возрастает с глубиной, приводя к неполному разложению, с чем часто связывают доминирование гидрогенотрофного метаногенеза над ацетокластическим в глубинных слоях торфа (Conrad, 2020). Полное разложение органики должно приводить к отношению анаэробной продукции CO₂ и CH₄ (ОтАП) близкому к единице, что и наблюдается для торфа из верхнего слоя (Wilson et al., 2017), тогда как неполное – к величине ОтАП <1 (Conrad, 2020). Однако, согласно многочисленным экспериментальным данным, ОтАП >1 в глубинных слоях торфа олиготрофных болот (Wilson et al., 2017). Wilson с соавторами (2017) критически рассмотрели разные объяснения значений ОтАП >1 и предложили гидрогенизацию двойных углеродных связей как единственно возможный непротиворечивый вариант, но не смогли получить количественное подтверждение. Анаэроб-

ное окисление метана до CO₂ с использованием альтернативных акцепторов электронов (то есть, сульфатов, нитратов и т.д., но не кислорода), которое тоже увеличивает ОтАП, Wilson с соавторами (2017) отвергли в качестве объяснения из-за низких концентраций этих акцепторов в глубинных слоях верховых болот. Целью нашей работы было проверить, может ли анаэробное окисление метана объяснить значения ОтАП >1 в глубинных слоях торфа верховых болот, и действительно ли гидрогенотрофный метаногенез доминирует в этих слоях.

Для исследования цикла метана в глубинных слоях торфа мы совместили лабораторные инкубационные эксперименты с внесением фторметана (ингибитора ацетокластического метаногенеза), полевые измерения профилей концентрации метана, основных анионов и катионов, летучих жирных кислот, изотопного состава С и Н в метане, С в CO₂ и Н в воде, а также секвенирование ампликонов гена 16S рРНК в ДНК, выделенной из торфа (Sabrekov et al., 2024). Пробы торфа для анаэробной инкубации при 5°C были отобраны в трёх репрезентативных верховых болотах средней тайги Западной Сибири в сентябре 2021 года: Мухрино (на глубине 1, 2 и 3 м - образцы М1, М2 и М3), Лемпино (1 и 2 м - L1 и L2) и Чистое (1 м - Ch1). Кроме того, пробы из болота Мухрино с глубины 10-20 (M0.2И и M0.2С, отобранные в июле и сентябре соответственно) и 40-50 см (M0.5) от поверхности анаэробно инкубировались при 15 и 10°C соответственно. Эксперимент ставился для каждой пробы в 2-3 кратной повторности и в двух вариантах: без внесения

чего-либо (контроль) и с внесением фторметана. В ходе инкубации (60 дней для поверхностных образцов, 150 - для глубинных) методом газовой хроматографии измерялись концентрации углекислого газа и метана. Составы стабильных изотопов измерялись методом газовой хроматографии - масс-спектрометрии изотопных отношений. Отбор проб для измерения профилей концентраций метана, ионов, кислот и состава стабильных изотопов проводили в болоте Мухрино на глубинах от 20 до 300 см в сентябре 2021 года. Отбор проб торфа для секвенирования проводили так-

же в болоте Мухрино на глубинах 20, 50 и 150 см в мае, июле и сентябре 2021 года в трёх повторностях. Расчёт доли метана, избежавшего анаэробного окисления, а также прочие детали отбора проб и анализа данных описаны в (Sabrekov et al., 2024).

Лабораторные эксперименты показали, что анаэробная продукция CO_2 снижалась с глубиной слабее, чем анаэробная продукция CH_4 (Рис. 1а), что привело к росту ОТАП с 1-1.2 в верхнем слое торфа до 3-9 в глубинных слоях (Рис. 1б). Именно это явление мы и попытались объяснить.

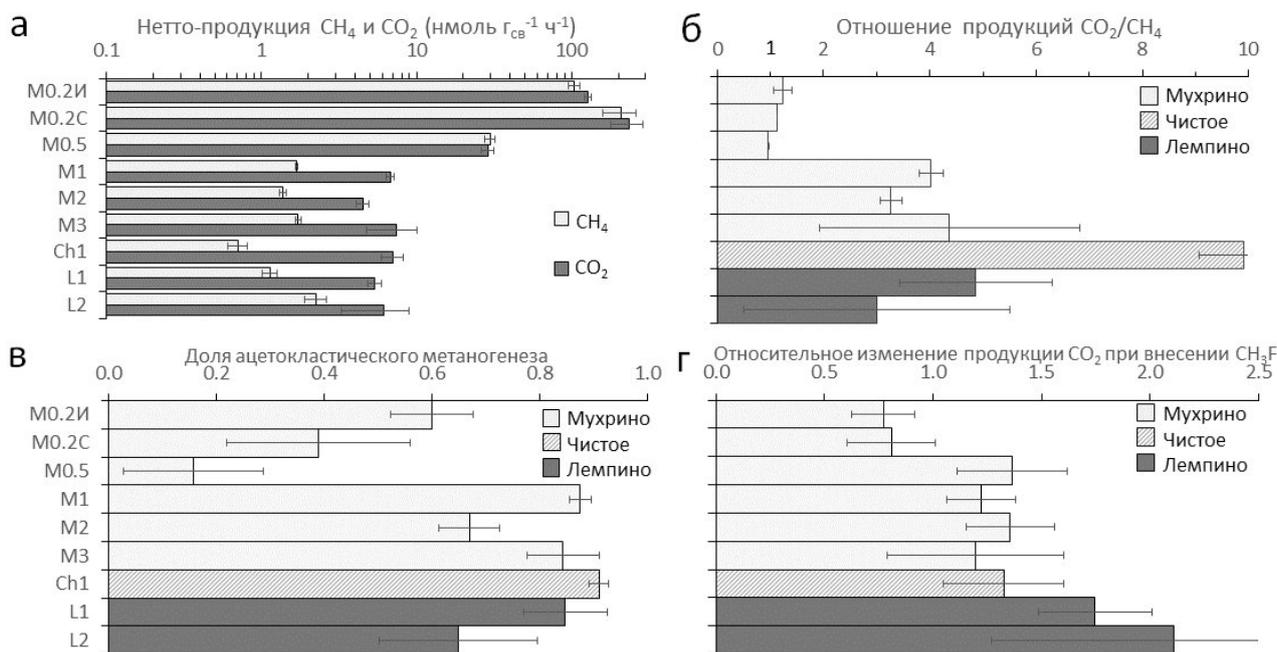


Рисунок 1. Результаты анаэробных инкубационных экспериментов с образцами торфа: (а) продукция CO_2 и CH_4 и (б) ОАП в контрольном эксперименте, (в) вклад ацетокластического метаногенеза в общую продукцию, (г) отношение продукции CO_2 при внесении фторметана к продукции CO_2 в контрольном эксперименте

Анаэробное окисление метана снижало продукцию метана на 4-69%, при этом медианные значения доли окисленного метана при расчёте по изотопному составу С и Н (0.39 и 0.36 соответственно) совпадали, что указывает на корректность предложенной модели расчётов, дающей сходные результаты по независимым данным (Рис. 2а). Чем выше была доля анаэробно окисленного метана, тем легче был изотопный состав углерода в CO_2 (Рис. 2б), что является независимым подтверждением протекания анаэробного окисления. Вычисленные при предположении об отсутствии анаэробного окисления составы изотопов С и Н в метане во всех случаях оказались легче измеренных в контрольном эксперименте (Рис. 2в-г), что также подтверждает повсеместное распространение анаэробного окисления в глубинных слоях торфа. Скорректированные на влияние анаэробного окисления

значения ОТАП оказались значимо ниже ОТАП в контрольных экспериментах (Рис. 2д), при этом для проб М2, М3, L1 и L2 анаэробное окисление метана позволяет объяснить всю «избыточную» продукцию CO_2 . Метанотрофы (микрорганизмы, окисляющие метан) из семейства *Methylomonaceae* были найдены по всему профилю болота, а из семейства *Methylomirabilaceae* – только в глубинных слоях торфа, что является ещё одним независимым подтверждением протекания анаэробного окисления метана в этих слоях. В качестве акцепторов электронов могут использоваться нитрат, поскольку представители семейства *Methylomirabilaceae* осуществляют нитрит-зависимое окисление метана, и/или сульфат, поскольку концентрация сульфата падает на тех же глубинах (60-150 см), где одновременно утяжеляются составы стабильных изотопов С и Н в метане.

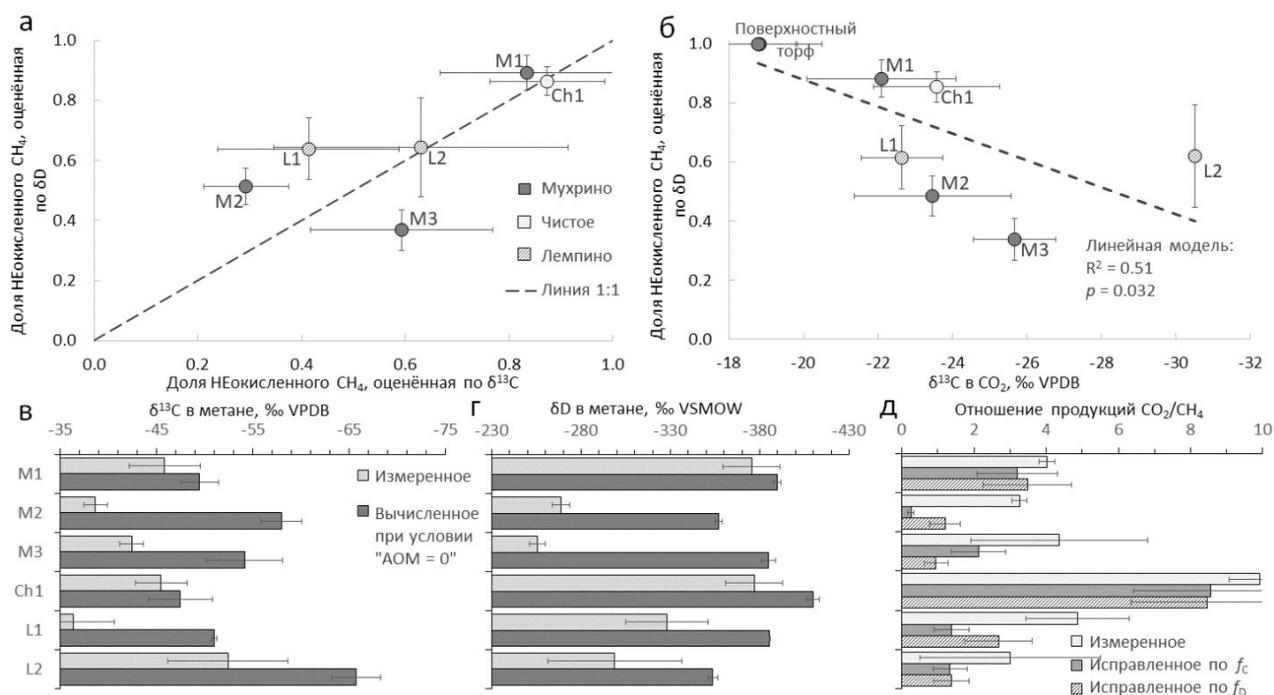


Рисунок 2. Анаэробное окисление метана в инкубационных экспериментах: (а) доли неокисленного метана, рассчитанные по изотопному составу С и Н в CH₄, (б) снижение δ¹³С в CO₂ при увеличении интенсивности анаэробного окисления CH₄, (в-г) сравнение измеренных и вычисленных при допущении об отсутствии анаэробного окисления изотопных составов С и Н в метане, (д) изменение ОАП с учётом доли анаэробно окисленного метана, вычисленной по изотопным составам С и Н в метане.

Рост концентрации ацетата и пропионата и снижение продукции CO₂ (Рис. 1г) после добавки фторметана в экспериментах с торфом из верхнего слоя показывает, что ацетат потреблялся именно ацетокластическими метаногенами, выделяющими CO₂ как побочный продукт. В таких же экспериментах с глубинным торфом, наоборот, концентрации кислот оставались ниже предела детекции, а продукция CO₂ возрастала (Рис. 1г), что указывает на то, что помимо метаногенов в этих слоях есть другие потребители ацетата, которые анаэробно окисляют его до CO₂. Наиболее очевидные кандидаты на роль таких потребителей – сульфат-редукторы *Desulfobacca* и нитрат-редукторы *Burkholderiaceae*, появляющиеся в составе микробного сообщества на глубине 150 см. Обязательный сульфат-редуктор *Desulfobacca*, окисляющий ацетат, может сосуществовать с ацетокластическими метаногенами в средах, где концентрация ацетата недостаточна для полного окисления органики (Stams et al., 2019). Представители семейства *Burkholderiaceae* осуществляли нитрат-зависимое окисление ацетата при анаэробной инкубации торфа (Hetz and Horn, 2021). Таким образом, в глубинных слоях торфа анаэробно окисляется не только метан, но ключевой субстрат для его синтеза – ацетат, что также объясняет, почему ОТАП >1.

Ацетокластический метаногенез доминировал в глубинных слоях, его вклад в общую продукцию метана был значительно выше в глубинных слоях по сравнению с верхним слоем (Рис. 1в). При этом с глубиной значительно падала доля таксонов, считающихся олиготрофными, и возрастала доля таксонов, считающихся копитрофными. С глубиной также возрастала доля в сообществе представителей семейства *Anaerolineaceae* и класса KD4–96, типичных для эвтрофных, но не олиготрофных болот (Ivanova et al., 2020). Все эти наблюдения противоречат традиционному представлению о возрастании устойчивости органики и снижении доступности лабильного углерода с глубиной в верховых болотах и заставляют задуматься о механизме, который обеспечивает большую доступность органики. Таким механизмом могут быть кратковременные поступления неорганических акцепторов электронов из минеральных слоёв, подстилающих болото.

Таким образом, анаэробное окисление метана действительно происходит в глубинных слоях верховых болот и может по крайней мере в некоторых случаях объяснить более высокую анаэробную продукцию CO₂ по сравнению с продукцией CH₄. Анаэробное окисление ацетата также протекает в этих слоях, что дополнительно снижает продукцию CH₄, лишая метаногенов основного субстрата, и увеличивает продукцию CO₂.

Работа выполнена при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов...» (рег. № 123030300031-6).

1. Conrad R. Importance of hydrogenotrophic, acetoclastic and methylotrophic methanogenesis for methane production in terrestrial, aquatic and other anoxic environments: a mini review // *Pedosphere*. 2020. V. 30, № 1. P. 25–39.
2. Hetz S.A., Horn M.A. Burkholderiaceae are key acetate assimilators during complete denitrification in acidic cryoturbated peat circles of the arctic tundra // *Frontiers in Microbiology*. 2021. V. 12. P. 628269.
3. Ivanova A.A., Beletsky A.V., Rakitin A.L. [et al.] Closely located but totally distinct: highly contrasting prokaryotic diversity patterns in raised bogs and eutrophic fens // *Microorganisms*. 2020. V. 8, № 4. P. 484.
4. Sabrekov A.F., Semenov M.V., Terentieva I.E. [et al.] Anaerobic methane oxidation is quantitatively important in deeper peat layers of boreal peatlands: Evidence from anaerobic incubations, in situ stable isotopes depth profiles, and microbial communities // *Science of The Total Environment*. 2024. V. 916. P. 170213.
5. Stams A.J.M., Teusink B., Sousa D.Z. Ecophysiology of acetoclastic methanogens // *Biogenesis of Hydrocarbons, Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. Cham : Springer, 2021. P. 109–121.
6. Wilson R.M., Tfaily M.M., Rich V.I. [et al.] Hydrogenation of organic matter as a terminal electron sink sustains high CO₂:CH₄ production ratios during anaerobic decomposition // *Org. Geochem*. 2017. V. 112. P. 22–32.
7. Yu Z.C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review // *Biogeosciences*. 2021. V. 9. P. 4071–4085.

**Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed mire ecosystems.
Biogeochemistry of peats and mire waters**

Dynamics and carbon stocks in mire ecosystems

**Биогеохимические циклы
естественных
и антропогенно-нарушенных
болотных экосистем.
Биогеохимия торфов
и болотных вод.**

**Динамика накопления
и запасы углерода
в болотных экосистемах**

ЗАПАС УГЛЕРОДА В ТОРФАХ БОЛОТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (НОВЫЙ ПОДХОД)

CARBON STOCK IN PEATS OF RUSSIAN FEDERATION WETLANDS (NEW APPROACH)

***С.Э.Вомперский¹, А.А. Сирин¹, Т.В. Глухова¹, О.П. Цыганова¹, Н.А. Валяева¹
S.E. Vompersky¹, A.A. Sirin¹, T.V. Glukhova¹, O.P. Tsyganova¹, N.A. Valyeva¹***

**Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Россия)
E-mail: root@ilan.ras.ru, nas57nas57@yandex.ru, glutam@mail.ru**

Болота - одни из наиболее представленных экосистем на территории Российской Федерации (РФ). На Россию приходится более трети болот мира и, из-за разнообразия географических условий, широкий спектр их природных вариантов. Благодаря уникальным свойствам, выраженным, прежде всего, в наличии торфяной залежи, болота и заболоченные земли играют важную роль в поддержании природных процессов на местном, региональном и глобальном уровнях в регулировании круговорота воды, углерода и других природных компонентов. Торфяная залежь является важнейшим на суше резервуаром долговременного стока атмосферного углерода, смягчая «парниковый эффект». Болота, вклад которых в поддержание биоразнообразия и регулирования природных процессов очевиден, никогда не были объектом инвентаризации как экосистемы. Даже такая базовая оценка болот, как общая площадь на территории страны, расходится у разных авторов. В литературе имеются очень разные оценки площадей болот бывшего СССР и современной России. Низкая точность или неполнота исходных данных главная причина этого. Особенно различаются экспертные (без достаточного объяснения методов подсчета) оценки: от 160 млн.га всех болот бывшего СССР (Botch et al., 1995) до 273 млн.га только в одной России (Efremov et al., 1998).

Определение площадей заболоченных мелкоотторфованных земель и болот в 90-е годы проводилось по их изображению на Почвенной карте РСФСР, М 1: 2.5 млн. (Почвенная карта РСФСР, 1988) с распределением по трапециям 1° широты на 2° долготы. Каждый учитываемый контур (выдел) в пределах трапеции измерялся палеткой, использовался метод регулярных точечных сеток (2x2 мм) при двукратном наложении палетки на трапецию с поворотом на 90 град., т.е. представлял собой большой объем ручной обработки картографического материала (Вом-

перский и др., 1994). Таким образом, Почвенная карта передавала 53 названия почвенно-картографических единиц.

В результате этой работы было установлено (Вомперский и др., 1994), что в России имеется 139 млн. га болот со слоем торфа > 0.3 м. Громадной оказалась площадь заболоченных земель со слоем торфа до 0.3 м - 230 млн.га. Таким образом, вместе болотные и заболоченные оторфованные земли составляют 369.1 млн.га, т.е. 21.6% территории страны (Вомперский и др., 1994).

Для перехода от пространственной привязки к трапециям географических координат к непрерывному картографическому изображению был использован цифровой вариант указанной выше карты, созданный в Институте почвоведения им.В.В. Докучаева и опубликованный Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, где площади почв даны в процентах от территории субъекта Российской Федерации (Единый государственный..., 2014). Затем, с созданием геоинформационной системы (ГИС) «Болота России» в Институте лесоведения РАН (Вомперский и др., 2005), помимо картографической основы, стало возможным включать различные постоянно пополняемые слои тематического содержания, касающиеся распространения болот и заболоченных земель (рис.), определить площади оторфованных земель и болот, а также запас углерода в их торфах в целом по стране.

Для более точной оценки площадей болот, запасов торфа и углерода в болотных экосистемах и заболоченных мелкоотторфованных местообитаниях были использованы данные об их распространении согласно ГИС «Болота России» ИЛАН РАН (Вомперский и др., 2005) и, как и в первоначальной оценке (Вомперский и др., 1994), материалы разведки торфяных месторождений, литературные

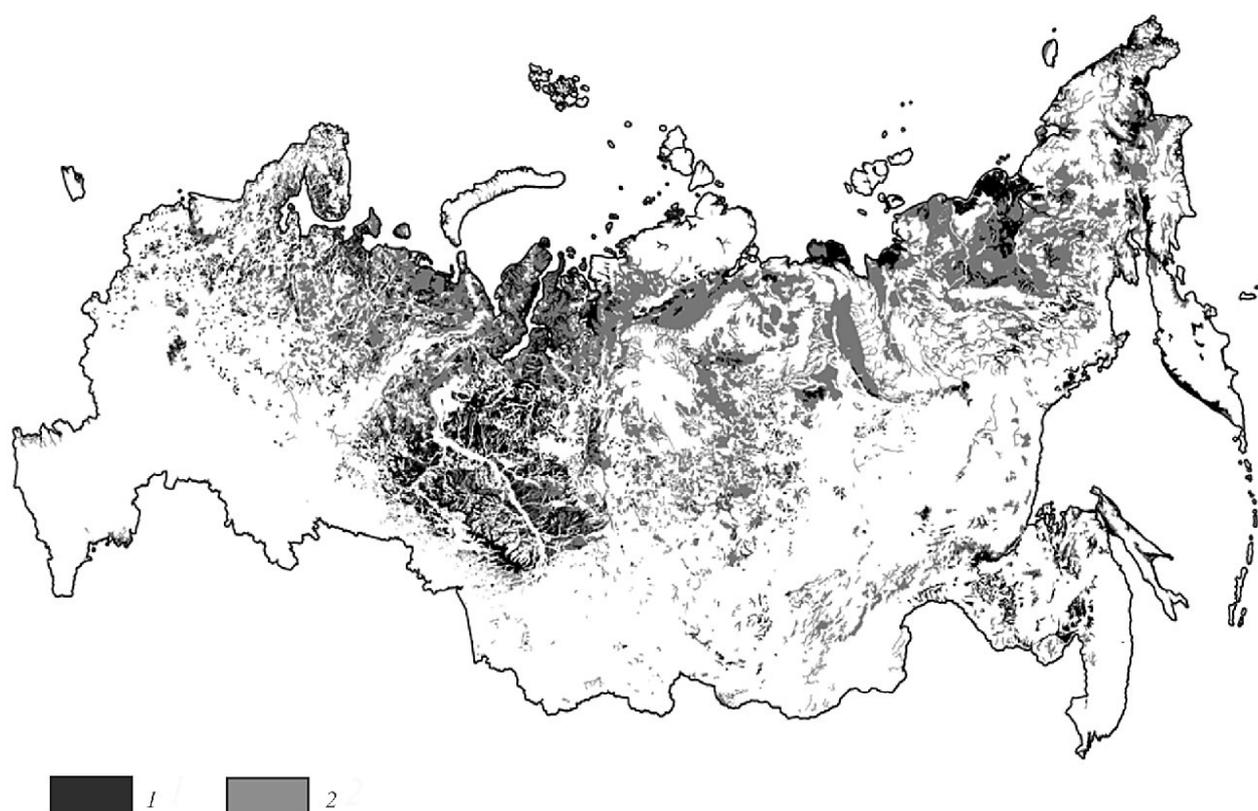


Рисунок. Распространение болот (мощность торфа >0.3 м) (1) и заболоченных мелкоотторфованных земель (мощность торфа < 0.3 м) (2) на территории Российской Федерации. ГИС «Болота России» ИЛАН РАН (Вомперский и др., 2005).

данные (Атлас..., 1968). Объединение «Торфгеология» в течение многих лет публиковало в областных справочниках сведения о торфяных месторождениях, где указывались данные по запасам торфа как в объемных (тыс.м³), так и в весовых (млн.т) единицах, представлялась информация о средней глубине месторождений, типе торфяной залежи.

Учитывались только те почвы, в профиле которых имеется торфяной слой 0.1 м и более. Для мелкоотторфованных (до 0.5 м) земель объем отложений определялся умножением площади картографических контуров разных заболоченных почв на свойственную им глубину торфа. Оценка запасов торфа болот глубиной более 0.5 м проводилась на основе учтенных торфяных месторождений по состоянию на 1.01.1991 согласно «Балансу запасов полезных ископаемых России на 1 января 1991 года» (Баланс.... 1992). С тех пор новые изыскания практически остановлены, оценки ресурсов торфа не устарели. Содержание углерода в абсолютно сухом торфе, по литературным данным, имеет большой разброс от 48 до 65 % (Лиштван, Король, 1975; Ефимов, 1986). Мы приняли содержание углерода в торфах 50% из-за разнообразия типов болот и заболоченных земель на обширных территориях РФ

Таблица. Запас торфа (абсолютная сухая масса) и углерода в болотах и заболоченных местообитаниях Российской Федерации, млрд.т

	Тип местообитания		Запас
	Торф в болотах	Талые болота	
Переходные			44.54
Низинные			15.45
Мерзлые болота		Верховые	3.76
	Переходные	22.74	
Торф в заболоченных землях	Заболоченная тундра и лесотундра		18.69
	Заболоченные таежные леса и редколесья		26.38
	Заболоченная пойма		1.05
Углерод	Торфа болот и заболоченных земель		108.71
	Торфа болот		85.62

Ключевым отличием данной работы от прежних оценок послужило применение оцифрованной почвенной карты и ГИС «Болота России». По сравнению с предыдущими оценками, площадь уменьшилась на 11%. В результате площадь болот со слоем торфа более 0.5 м оказалась

99.5 млн.га. Для площади мелкоотторфованных земель мы провели, согласно легенде Почвенной карты РСФСР (1988), анализ структуры этих земель и получили 228.7 млн. га. Суммарная площадь составила 328.2 в отличие от прежней - 369.1 млн.га. Запас торфа в болотах представлен 171.3, а в заболоченных землях - 46.1 млрд.т. Общий запас углерода в торфах болот и заболоченных мелкоотторфованных земель страны оценен в 108.7 млрд. т (табл.): 85.7 млрд. т приходится собственно на болота и 23.0 млрд. т – на заболоченные земли. Расчет запаса углерода по старой методике - 113.5 млрд.т (Вомперский и др., 1994). Основной вклад в запас углерода болот страны вносят верховые болота – 39% всего запаса углерода торфов, 20.5% –переходные болота и 7% – низинные. Более 12% запаса углерода в торфе болот содержится в мерзлых болотах – по-

лигональных и бугристых. Среди заболоченных земель лидируют заболоченные таежные леса и редколесья (12%), тундра и лесотундра (8.6%) и 0.5% – заболоченные поймы. Разница в запасе углерода с привлечением современных методов составила в 4.8 млрд.т, т.е. в меньшую сторону по сравнению с определением в 90-е годы.

В результате проведенной работы получены данные по площадям болот и заболоченных территорий, а также запаса углерода в их торфах по субъектам Российской Федерации. Кроме того, оценены запасы углерода отдельно для основных групп типов болот и заболоченных земель.

Следующий этап нашей работы состоит в определении (по субъектам РФ) площадей лесных болот, имеющих два пула биогенного углерода: в торфах и биомассе.

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. No 123030300031-6).

1. Атлас торфяных ресурсов СССР / отв. ред. Сысоев Д.В. / МИНгео РСФСР. 1968. 96 с.
2. Баланс запасов полезных ископаемых России на 1.01.1991. М.: Роскомнедра. СГП по разведке торфа «Торфгеология». 1992. 91 с.
3. Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г. Заболоченные органогенные почвы и болота России и запас углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. №12. С.17-25.
4. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Серия географическая. 2005. № 5. С. 39–50.
5. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России // Почвенный институт им. В.В.Докучаева. 2014 <http://egrpr.soil.msu.ru>
6. Ефимов В.Н. Торфяные почвы и их плодородие. Л.: Агропромиздат. 1986. 264 с.
7. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск. 1975. 318 с.
8. Почвенная карта РСФСР. М.: 1:2500000. Под ред. Фридланда В.М. М.: ГУГК СССР, 1988. 16 л.
9. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // Global Biogeochemical Cycles. 1995. Vol.9. №1. P.37-46.
10. Efremov S.P., Efremova T.T., Melentyeva N.V. Carbon Storage in Peatland Ecosystems // Carbon storage in Forests and Peatlands of Russia. 1998.

НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ГОЛОЦЕНЕ НА ПРИМЕРЕ ОМБРОТРОФНОГО ТОРФЯНИКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

HOLOCENE CARBON ACCUMULATION RATES IN THE OMBROTROPHIC PEATLAND OF WESTERN SIBERIA

Е.Э. Веретенникова^{1,2}, Г.В. Симонова¹, И.В. Курьина¹

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

² Сибирский государственный медицинский университет (г. Томск, Россия)

E-mail: lena2701@yandex.ru

Введение. Учёные рассчитывают так называемую кажущуюся скорость накопления углерода – CAR (carbon accumulation rate), для того чтобы получить информацию о содержании углерода, сохранившегося в виде торфа в течение длительного периода времени, и понять долгосрочную реакцию запасов углерода торфяников на климатические изменения в разные периоды голоцена (например, Young et al., 2021). Торфяники Западной Сибири содержат ~70 Pg углерода, что составляет значительную часть глобального пула углерода в болотах, однако, несмотря на свою значимость, данных о долгосрочных закономерностях накопления углерода, по-прежнему недостаточно и они демонстрируют существенные различия. Например, наблюдения варьируются от свидетельств почти полного прекращения накопления углерода за последние несколько тысяч лет в арктических торфяниках (Peteet et al., 1998) до быстрого накопления углерода в торфяных отложениях таежной зоны (например, Turunen et al., 2001; Borren et al., 2004; Veilman et al., 2009). В данной работе, мы исследуем изменение скорости накопления углерода (с высоким временным разрешением) в торфяной залежи омбротрофного торфяника с момента его формирования по настоящее время.

Объекты и методы. Объектом исследования является торфяная залежь сосново-кустарничкового-сфагнового микроландшафта (или ряма), который развивается на болотном массиве «Центральное». Болотный массив «Центральное», расположен в ложбине древнего стока на левом берегу р. Суйга, являющейся левобережным притоком р. Кеть (Верхнекетский район Томской области, окрестности поселка Нибегинский; координаты - 84°55'с.ш., 58°18'в.д.). Торфяная залежь болота сформирована под влиянием литологического состава вмещающих рыхлых пород, среди которых преобладают песчаные разности. Мощность торфяной залежи в точке отбора составила 230 см. Возраст торфяных

отложений установлен по ¹⁴C в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск) на ультра-низкофономом жидко-сцинтилляционном спектрометре-радиометре Quantulus-1220 (Wallac, Финляндия). Полученные даты откалиброваны при помощи калибровочной кривой IntCal3.

С целью определения основных свойств стратиграфии торфяной залежи нами были выполнены следующие анализы: ботанический состав (Кац и др., 1977), объемная плотность (ГОСТ - 24701-2013). С целью диагностики обводненности условий среды в которых формировалась торфяная залежь исследовались следующие прокси: гумификация торфа (Ih), и отношение C/N. Гумификация торфа определялась в соответствии с методикой (Blackford and Chambers, 1993) с просвечиванием щелочного экстракта на спектрофотометре UV-1601 (PC) Shimadzu (длина волны 540 нм). Отношение C/N рассчитывалось согласно полученным данным о содержании углерода и азота. Все исследуемые прокси определялись с шагом 1 см, за исключением ботанического состава, который определялся с шагом 5 см.

Вертикальную скорость накопления торфа (PAR, мм/год) рассчитывали по возрастной модели и толщине слоя образца (1 см). Скорости накопления углерода (CAR, гC м⁻² год⁻¹) рассчитывали по формуле, предложенной Tolonen и Turunen (1996):

$$CAR = PAR \cdot 10 \cdot C \cdot \rho,$$

PAR – скорость накопления торфа (мм/год);
C – общее содержание органического углерода (%);
ρ – плотность торфа (г/см³).

Мы также рассчитали долгосрочную кажущуюся скорость накопления углерода (LORCA), то есть среднюю скорость накопления углерода (CAR) в слое катотельма (в интервале глубин от 45 до 299 см, что соответствует 160-5200 кал. л. BP; верхний активно разлагающийся слой акротельма был исключен (Turunen et al., 2004).

Результаты и их обсуждение. Исследуемая торфяная залежь практически полностью сложена верховым сфагновым торфом среди которых выделены: *Sphagnum fuscum*, *Sph. magellanicum* и *Sph. angustifolium* и их процентный вклад изменяется на разных стадиях развития болота. Придонный слой торфяной залежи (229-189 см) представлен торфами в составе которых отмечается высокое содержание остатков древесной и злаковой растительности, а также болотных трав, но вместе с тем отмечается практически полное отсутствие моховой растительности. Вертикальная скорость роста торфа на исследуемом торфянике изменялась от 0,13 до 2,57 мм/год, при среднем значении - $1,14 \pm 0,99$ мм/год; плотность торфа варьировалась от 0,041 до 0,162 г/см³, при среднем значении - $0,08 \pm 0,03$ г/см³; содержание углерода - от 41,12 % до 59,14 %, при среднем - $49,39 \pm 3,89$.

Рассчитанное нами среднее значение темпов накопления углерода (CAR) за всю историю

формирования залежи исследуемого торфяника составило $43,43 \pm 39,94$ гС м⁻² год⁻¹, варьируясь от 7,13 до 128,8 гС м⁻² год⁻¹, и эти результаты ясно показывают, что процесс накопления углерода в торфе может быть удивительно изменчивым. В нашем торфянике мы обнаружили две очевидные особенности:

1) очень медленные темпы торфонакопления (0,13 мм/год) и связанные с этим самые низкие CAR (от 7,13 до 8,65 гС м⁻² год⁻¹; при среднем - $7,87 \pm 0,41$ гС м⁻² год⁻¹) за весь период развития торфяника (т.е. с момента начала его формирования - 5200 кал. л. ВР до ~2850 кал. л. ВР, что соответствует интервалу глубин 229-199 см) (рисунок 1). Этот период характеризуется минеротрофной фазой развития торфяника с преобладанием в торфе остатков сосудистых растений. В целом низкие темпы накопления торфа и углерода в этот период связаны с сухой поверхностью болота на что указывают индекс *I_h* ($0,75 \pm 0,13$), а соотношение C/N ($32 \pm 9,3$) свидетельствует о хорошей разлаженности торфа.

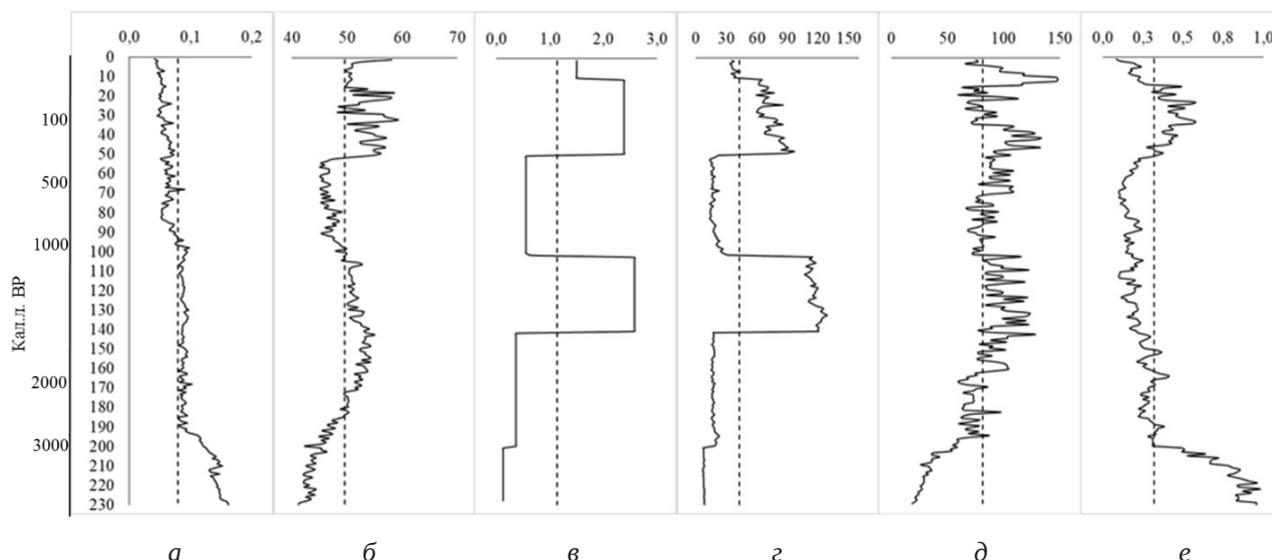


Рисунок 1. Исследуемые прокси: а) – плотность, г/см³; б) – содержание углерода, %; в) – PAR, мм/год; г) – CAR, г С м² год⁻¹; д) – C/N; е) – индекс гумификации (*I_h*).

2) очень высокие CAR (от 106,5 до 129,9 при среднем - $117 \pm 5,18$ гС м⁻² год⁻¹) обнаруженные в период с 1240 по 1090 кал. л. ВР (140-102 см) (см рисунок 1). Причины столь высокого CAR в нашем торфянике нам пока до конца не ясны, но очевидно, что в первую очередь это связано с высокой скоростью накопления торфа (2,58 мм/год) и предотвращения его разложения в обводненных условиях среды, о чем свидетельствуют полученные величины прокси (низкие значения *I_h* и высокие - C/N), в то время как плотность торфа колебалась в интервале средних значений ($0,089 \pm 0,004$ г/см³). Наши полученные значения

практически совпадают с самыми высокими на сегодняшний день, представленные в литературе, значениями о CAR (139 гС м⁻² год⁻¹), полученные для торфяника с острова Бошен (Фолклендские острова) (Paune et.al., 2019). Исследователи объясняют этот феномен продолжительностью вегетационного периода в сочетании с повышенным поступлением питательных веществ со стороны моря. Так же следует отметить очень высокий показатель CAR ($88,6$ гС м⁻² год⁻¹) рассчитанный для финских болот (Tolonen and Turunen, 1996), что по мнению авторов обусловлено чрезвычайно высокой плотностью торфа. Вообще кратковре-

менное увеличение накопления углерода может отражать изменение толщины слоя акротельма и степени распада растительного материала, который будет достигать слоя катотельма (Malmer and Wallen, 2004), а это в свою очередь контролируется такими факторами как положение и изменение уровня болотных вод, а также температуры и свойств подстилки (Bauer, 2004).

В нашем торфянике также выделяется два периода, характеризующиеся практически одинаковыми CAR: $17,31 \pm 1,55$ и $17,95 \pm 3,71$ гС м⁻² год⁻¹. Один из них отмечен в период формирования залежи с 2825 по 1270 кал л. ВР (199-140 см) (далее - ранний период), а второй – с 1086 по 167 кал л. ВР (101-50 см) (далее – поздний период). Несмотря на то, что эти периоды характеризуются очень близкими CAR, в более ранний период развития торфяной залежи содержание углерода в торфе ($47,01 \pm 1,71$) и скорость накопления торфа (0,37 мм/год) была ниже по сравнению с более поздним периодом, во время которого скорость торфонакопления составила - 0,56 мм/год, соответственно, но содержание углерода в торфе в среднем была несколько выше ($50,21\% \pm 2,78$). Ранний период характеризуется более сухими условиями среды ($I_h = 0,29 \pm 0,04$) и судя по значениям C/N ($77,7 \pm 14,6$) более интенсивной скоростью разложения торфа по сравнению с поздним периодом, когда условия среды характеризовались повышенной влажностью ($I_h = 0,16 \pm 0,05$), которая способствовала поднятию уровня воды в торфянике, и это сокращало время пребывания подстилки в аэробном слое (Malmer and Wallen, 2004) и уменьшало

распад растительности (C/N изменяется от 66,9 до 108,9, при среднем $85,8 \pm 11,5$).

Самый верхний слой торфяной залежи (акротельм) (~ 160 кал. л. ВР. по н.в.; 49-0 см) характеризуется довольно высокими значениями CAR (от 33,5 до 96,7 г С м⁻² год⁻¹ при среднем - $65,7 \pm 17,5$ г С м⁻² год⁻¹), что явно превышает рассчитанное нами среднее CAR для всей торфяной залежи. Этот факт является скорее нормой, чем исключением, и в этом смысле наш торфяник ничем не отличается от большинства других торфяников по всему миру, которые могут демонстрировать еще более значительные различия между современными и долгосрочными тенденциями накопления углерода (Young et al., 2021). Например, по данным Beilman et al. (2009) в приповерхностных слоях (0-50 см) торфяников южной тайги Западной Сибири, средние значения CAR могут изменяться в очень широком диапазоне - от 42 до 269 г С м⁻² год⁻¹.

Среднее значение LORCA для нашего торфяника, составляет $37,5 \pm 42,0$ гС м⁻² год⁻¹, что выше глобального значения, предложенного для северных торфяников (23 г С гС м⁻² год⁻¹; Loisel et al., 2014), но находится в рамках значений LORCA, рассчитанных для торфяников южной тайги и подтайги Западной Сибири (Borren et al., 2004). Интересным фактом является то, что, полученное нами значение LORCA идентично среднему значению LORCA ($37,5 \pm 14,6$ гС м⁻² год⁻¹) для северо-западных иберийских торфяников (Pontevedra-Pombal et al., 2006), с той лишь разницей, что наши значения характеризуются очень сильной изменчивостью во времени.

1. Bauer I. E. (2004) Modelling effects of litter quality and environment on peat accumulation over different time-scales. *Journal of Ecology* 92: 661–674.
2. Beilman D. W., MacDonald G.M., Smith L.C., Reimer P.J. (2009) Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 year. *Global Biogeochem. Cycles*, 23: GB1012, doi:10.1029/2007GB003112.
3. Borren W., Bleuten W., Lapshina E. D. (2004) Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia. *Quat. Res.*, 61: 42 – 51, doi:10.1016/j.yqres.2003.09.002
4. Charman D.J., Mäkilä M. (2003) Climate reconstruction from peatlands. *Pages Newsletter*, 1: 15-17.
5. Loisel J., Yu Z. et al. (2014) A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation. *The Holocene*, 1–15, doi: 10.1177/0959683614538073 hol.sagepub.com
6. Malmer N., Wallén B. (2004) Input rates, decay losses and accumulation rates of carbon in bogs during the last millennium: internal processes and environmental changes. *The Holocene*, 14 (1): 111–117.
7. Payne R.J., Fin R-H., Rush G., Sloan T.S., Evans Ch. D., Mauquoy D. (2019) Peatland initiation and carbon accumulation in the Falkland Islands. *Quat. Sci. Rev.*, 212: 213-218 <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.03.02>
8. Peteet D., Andreev A., Bardeen W., Francesca F. (1998) Long-term Arctic peatland dynamics, vegetation and climate history of the Pur-Taz region, western Siberia. *Boreas*, 27: 115 – 126.
9. Pontevedra-Pombal X., Castro D., Souto M., Fraga I., Blake W.H., Blaauw M., A. López-Sáez J.A., Pérez-Díaz S., Valcárcel M., García-Rodeja E. (2019) 10,000 years of climate control over carbon accumulation in an Iberian bog (southwestern Europe). *Geoscience Frontiers*, 10: 1521-1533 <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.09.014>
10. Tolonen K., Turunen J. (1996) Accumulation rates of carbon in mires in Finland and implications for climate change. *The Holocene*, 6: 171-178.
11. Turunen J., Tomppo E., Tolonen K., Reinikainen A. (2002) Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions *The Holocene*, 12 (1): 69–80.
12. Young D.M., Baird A.J., Gallego-Sala A.V., Loisel J. (2021) A cautionary tale about using the apparent carbon accumulation rate (aCAR) obtained from peat cores. *Scientific reports* (www.nature.com/scientificreports).

АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА И ЗАПАСЫ МИКРОБНОЙ БИОМАССЫ В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ ПОЙМЕННЫХ БОЛОТ СЕВЕРО-ВОСТОКА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

THE CARBON ACCUMULATION AND MICROBIAL BIOMASS IN PEAT DEPOSITS OF FLOODPLAIN MIRES ON THE NORTH-EAST OF THE MIDDLE-RUSSIAN UPLAND

*Е.М. Волкова¹, А.В. Головченко², О.А. Леонова¹
E.M.Volkova¹, A.V.Golovchenko², O.A. Leonova¹*

¹Тулский государственный университет (г. Тула, Россия)

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

e-mail: ya.oly2012@yandex.ru

Комплекс природных условий обуславливает низкую заболоченность Среднерусской возвышенности (0,5%) (Волкова, 2018). Тем не менее, на данной территории представлены разные типы болот, среди которых наибольшую площадь занимают пойменные болота (80-85%) (Волкова, 2011). Такие болота претерпели максимальную трансформацию, поскольку не могут использоваться под сельскохозяйственные нужды без проведения мелиоративных мероприятий. Однако осушение пойменных болот имеет негативные последствия, что связано с увеличением скорости минерализации органического вещества в результате изменения водно-воздушного режима и усиления микробной деятельности. В соответствии с этим, актуальной является оценка влияния осушения на аккумуляцию углерода в торфах. Для обоснованной оценки влияния мелиорации необходим сравнительный анализ свойств торфов пойменных болот, как подвергшихся осушению, так и находящихся в ненарушенном состоянии.

Объектами исследования являлись ненарушенное болото Подкосьюмово (53,668344° N, 38,587615° E; площадь 1,2 га, мощность торфяной залежи 1,2 м) и подвергшееся осушению Большеберезовское болото (53,662822° N, 38,584583° E; площадь 5 га, мощность торфяной залежи – 2 м), сформированные в пойме р. Непрядва (приток р. Дон, Тульская область).

Образцы торфа были отобраны в ходе бурения в центральных частях болот. В образцах торфа определены ботанический состав и степень разложения микроскопическим методом (Волкова, 2009), объемный вес – гравиметрическим методом (Chambers et al., 2016), а также зольность (ГОСТ 23740—2016) и содержание карбонатов (ГОСТ 34467-2018). Потери от прокаливании вычисляли по формуле: 100% – зо-

льность (%). Из полученного значения вычитали содержание карбонатов, что позволило определить долю органического вещества для каждого образца торфа (%). Для расчета содержания углерода (%) использовали значение органического вещества в единице объема торфа, которое умножали на массовую долю углерода, определенную с использованием CHNSO-анализатора LECO TruSpecMicro в Институте органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН. Зная содержание, рассчитывали запас углерода для каждого 10-см слоя торфяных залежей болот.

Показатели микробного обилия определяли люминесцентно-микроскопическим методом (Методы почвенной биохимии и микробиологии, 1991). Для окрашивания препаратов использовали красители: акридин оранжевый (для учета клеток бактерий и актиномицетного мицелия) и калькофлуор белый (для учёта мицелия и спор грибов). Расчёт микробной биомассы проводили по формулам, приведенным в статье (Головченко, Волкова, 2019), в расчётах принимали, что содержание воды и углерода в клетках исследуемых микроорганизмов соответствует 80 и 50% (Полянская и др., 1995).

Определение ботанического состава и степени разложения торфов показали, что залежь Большеберезовского болота образована тростниковым торфом со степенью разложения 45-55%, а залежь болота Подкосьюмово – древесным, древесно-травяным и осоковым торфами со степенью разложения 40-50%. Содержание углерода в торфах изучаемых болот составляет, в среднем, 14% для болота Подкосьюмово и 31% для Большеберезовского болота. Запасы углерода для каждого 10-см слоя торфяных отложений варьируют от 28,1 до 79,4 кгС/м² (в среднем – 51,5 кгС/м²) для болота Подкосьюмово и от 45,7 до 210,7 кгС/м² (в среднем – 125 кгС/м²) для Большеберезовско-

го болота. Общий запас органического углерода на 1 м² залежи болота Подкосьюмово составляет 618,6 кг, для Большеберезовского болота – 2499 кг. Важно отметить, что, несмотря на высокие показатели аккумуляции углерода в залеже Большеберезовского болота, в верхних горизонтах снижаются показатели содержания (до 14,3%) и запасов (до 67,2 кгС/м²) углерода, что является следствием мелиоративных мероприятий.

Для исследуемых болот с учётом объёмного веса и мощности горизонтов были рассчитаны запасы микробной биомассы. Запасы, рассчитанные на полный профиль, составили в Большеберезовском болоте 897 г/м², что в 4 раза больше, чем на болоте Подкосьюмово (221 г/м²). Поскольку мощность полного профиля болота Подкосьюмово составляет 1,2 м, а мощность осушенного Большеберезовского болота – 2 м, был произведён расчёт запасов микробной биомассы на толщину 1,2 м. Расчёты показали, что тенденция превышения микробной биомассы в торфяной залежи Большеберезовского болота по сравнению с ненарушенным болотом Подкосьюмово сохраняется (824 и 221 г/м² соответственно).

Дробный анализ запасов микробной биомассы, рассчитанный на толщину 1,2 м, и учитывающий биомассу грибного мицелия, спор грибов, бактерий и актиномицетного мицелия показал, что в осушенном Большеберезовском болоте преобладает биомасса грибного мицелия (рис.). Она в 14 раз превосходит биомассу грибных спор и в 9 раз биомассу бактерий. Следует отметить, что основной пул грибного мицелия в этом болоте приходится на верхние (подвергшиеся осушению) горизонты.

В залежи болота Подкосьюмово (в отличие от Большеберезовского болота), доминирует бактериальная биомасса, она в 5 раз превышает биомассу и мицелия, и спор грибов (рис.). Следует отметить, что их запасы в этом болоте характеризуются одинаковыми величинами – по 30 г/м².

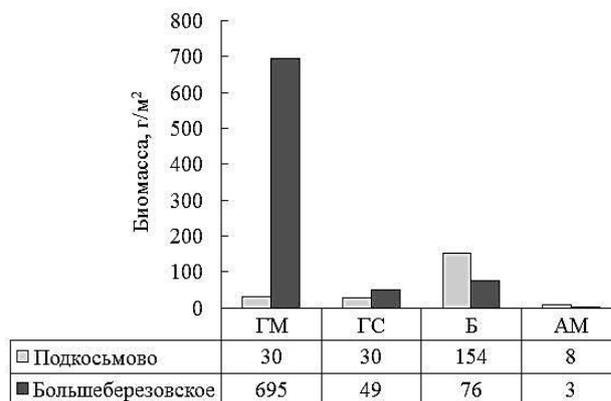


Рис. Запасы биомассы грибного мицелия (ГМ), спор грибов (ГС), бактерий (Б) и актиномицетного мицелия (АМ) в 1,2 метровом профиле ненарушенного (Подкосьюмово) и осушенного (Большеберезовское) болот

Сравнительный анализ структуры микробной биомассы в исследуемых болотах выявил существенные различия только в запасах грибного мицелия, которые в осушенном Большеберезовском болоте были в 23 раза больше, чем в ненарушенном болоте Подкосьюмово. Биомасса спор грибов, бактерий, актиномицетного мицелия отличалась в исследуемых болотах не более чем в 2,7 раза. Запасы углерода микробной биомассы составляют в анализируемой толще болоте Подкосьюмово – 1107 кгС/га, в Большеберезовском болоте – 4485 кгС/га.

Таким образом, осушение торфяной залежи Большеберезовского болота способствовало развитию главных аэробных деструкторов органического детрита – мицелиальных грибов, что привело к активной трансформации органического вещества и снижению запасов углерода в верхних горизонтах торфяной залежи. Проведенные исследования свидетельствуют о негативном влиянии осушения на депонирование углерода в торфяных залежах пойменных болот.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 23-24-10054 «Оценка роли разных типов болот Среднерусской возвышенности в углеродном обмене с атмосферой как основа для создания карбонового полигона (на примере Тульской области)» и соглашения с комитетом Тульской области по науке и инноватике No10 от 11.04.2023 г.

1. Волкова Е.М. 2009. Методы изучения болотных экосистем (учебное пособие). Тула: Гриф и К. 94 с.
2. Волкова Е.М. 2011. Пойменные болота северо-востока Среднерусской возвышенности // Ботанический журнал. Т. 96. № 4. С. 503-514.
3. Волкова Е.М. 2018. Болота Среднерусской возвышенности: генезис, структурно-функциональные особенности и природоохранное значение: Автореф. дис... докт. биол. наук. СПб. 46 с.
4. Головченко А.В., Волкова Е.М. 2019. Запасы и структура микробной биомассы в торфяниках карстовых ландшафтов Тульской области // Почвоведение. № 3. С. 370-376.
5. ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ
6. ГОСТ 34467-2018. Грунты. Методы лабораторного определения содержания карбонатов. Soils. Laboratory methods for determination of calcium carbonate content

7. Методы почвенной биохимии и микробиологии. 1991. М.: Изд-во Моск. ун-та, 304 с.
8. Полянская Л.М., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г. 1995. Микробная биомасса в почвах // Доклады АН. Т. 344. № 6. С. 846–848.
9. Chambers Lisa G., Ping Chin Yu, Gabriel M. F., Christopher B. G., Herndon E. M., Long D.T., Lyons W.B., Macpherson G.L., McElmurry S.P., McLean C.E., Moore J., Moyer R.P., Neumann K., Nezat C.A., Soderberg K., Teutsch N., Widom E. 2016. Developing the scientific framework for urban geochemistry // L.G. Chambers et al. / Applied Geochemistry. Vol. 67. P. 1-20.

**ДИНАМИКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ДРЕВОСТОЕ СОСНЯКА
АНДРОМЕДО-ПУШИЦЕВО-СФАГНОВОГО ЗА 50 ЛЕТ ПРИ ЭКСТЕНСИВНОМ
ОСУШЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОДТАЙГИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ
(ЗАПАДНОДВИНСКИЙ ЛЕСОБОЛОТНЫЙ СТАЦИОНАР)**

**DYNAMICS OF CARBON STOCKS IN THE STAND OF PINETUM
ANDROMEDO-ERIPHOROSO-SPHAGNOSUM OVER 50 YEARS UNDER
EXTENSIVE DRAINAGE IN THE CONDITIONS OF THE SUBTAIGA
OF EUROPEAN RUSSIA (ZAPADNODVINSK FOREST-SWAMP STATION)**

**А.А. Егоров, Т.В. Глухова, А.А. Широковская
А.А. Egorov, T.V. Glukhova, A.A. Shirokovskaya**

Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Россия)
E-mail: egorovfta@yandex.ru

На Западновинском лесоболотном стационаре Института лесоведения РАН (Тверская обл.), расположенном в подтайге Европейской России, в 1972-73 гг. проводились масштабные осушения торфяных земель для целей ведения эффективного лесного хозяйства (Биогеоценологическое ..., 1982). В 1974 г. в *Сосняке андромедо-пушицево-сфагновом* на верховом болоте в середине межканавья была заложена постоянная пробная площадь (ПП) под номером 5-74 (Биогеоценологическое ..., 1982: таблица 7 и таблица 18). Повторные обследования этой ПП проводились в 1983 и 2023 гг. Имея полные таксационные данные по растущему древостою за три рассматриваемых года мы поставили цель – оценить запасы углерода в древостое за 50 летний период наблюдений.

ПП 5-74 имеет площадь 0,36 га и прямоугольную форму 36×100 м², расположена в середине 106 м межканавья, что определило экстенсивный режим осушения. Глубина торфа более 4 м. Имеющиеся данные по древесному ярусу были уточнены и приведены к следующим показателям: средняя высота яруса, средний диаметр, количество деревьев на 1 га.

Сравниваемые за три периода древостои относятся к V классу возраста. Однако за рас-

сматриваемый период изменился бонитет и тип леса. Если в 1974 г. ПП 5-74 закладывалась в *Сосняке андромедо-пушицево-сфагновом*, который характеризовался Vб классом бонитета и на 1983 г. класс бонитета остается тем же, то в 2023 г. на этом месте уже был описан *Сосняк багульниково-сфагновый осушенный* Va класса бонитета.

Расчет запасов углерода (С) для древесного яруса проводился по усредненным показателям по каждому ярусу в соответствии с формулами, приведенными в методических указаниях Минприроды РФ (Об утверждении ..., 2017). Запас углерода в *Сосняке андромедо-пушицево-сфагновом* до осушения на 1974 г. составлял 3,09 т/га. В результате экстенсивного осушения через 10 лет в 1983 г. запас углерода в сосняке уже составлял 5,58 т/га, а через 50 лет сформировался *Сосняк багульниково-сфагновый осушенный* с запасом углерода 10,18 т/га.

Подводя итог необходимо отметить, что экстенсивное осушение сосняков на верховых болотах Vб класса бонитета привело к формированию через 10 лет более продуктивного сосняка Vб бонитета, а через 50 лет – сосняка Va бонитета с запасами углерода больше в 1,8 и в 3,3 раза соответственно.

Работа частично 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. No 123030300031-6).

1. Биогеоценологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией. М.: Наука, 1982. 208 с.
2. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 N 20-р (ред. от 20.01.2021).

БИОТИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ ПИРОГЕННО НАРУШЕННЫХ МЕЗОТРОФНЫХ КУСТАРНИЧКОВО-СФАГНОВЫХ БОЛОТ ПРИАМУРЬЯ

BIOTIC TURNOVER OF PYROGENIC SUCCESSION ON MESOTROPHIC DWARF SHRUB-SPHAGNUM MIRES OF PRIAMURIE REGION

T. A. Kopoteva

E.M. Koptseva

Institute of Water and Ecology problems FEB RAS (Khabarovsk, Russia)

e-mail: kopoteva@ivep.as.khb.ru

При проведении ботанического анализа торфяников Приамурья и Приморья, как олиготрофных так и низинных, очень часто встречаются следы палеопожаров – микро и макроугольки. Это говорит о том, что на эволюцию болот этих регионов значительное влияние оказывал, и сейчас оказывает, пирогенный фактор. Как одно из следствий, торфяники южной части Российского Дальнего Востока являются в основном маломощными (Прозоров, 1989). В своих исследованиях мы неоднократно обращали на это внимание, считая, что частые пожары на болотах не только снижают депонирующую функцию, но и приводят в итоге к необратимой деградации сфагнового покрова (Буренина, 2006). В одной из своих работ по моделированию динамики биотического круговорота Н. Н. Завалишин считает, что в случае сильного потепления климата по одному из сценариев с уменьшением осадков произойдет усиление разложения мертвого органического вещества (МОВ) и значительную роль будут играть пожары, «которые способны привести к быстрой деградации рямов» (Завалишин, 2017).

В течение длительного времени мы проводили наблюдения за восстановлением растительности на выгоревшем от пожара 2008 г. участке болотного массива, часть которого была осушена в 80-х годах прошлого века. Участок неосушенного болота, на котором были заложены пробные площади для исследований на негоревшем в 2008 г. участке (контроль) и гари, находится в непосредственной близости от заброшенной мелиоративной системы постоянно подвергавшейся постоянному влиянию пирогенного фактора (палы) со стороны дороги.

Поскольку все исследователи данной проблемы индикатором устойчивости торфяных болот к пирогенному фактору считают целостность сфагнового покрова (Наумов и др., 2009, Turetsky et al., 2015 и др.), мы сосредото-

чили здесь основное внимание на восстановлении мохового покрова. Учет фитомассы в моховом ярусе проводился один раз в конце сезона методом монолитов в 10 повторностях по горизонтам. К живой фитомассе у *Sphagnum divinum* мы отнесли запас фитомассы горизонта 0–10 см, у *S. fuscum* – 1/3 фитомассы этого горизонта, используя результаты определения живой части сфагновых мхов методом обработки бензидином с пероксидазой (Малышева, 1970). Живой фитомассой у *Polytrichum strictum* считали фотосинтезирующую верхнюю часть побега и боковые столоны в дернине в момент отбора.

Наблюдения за восстановлением мхов на гари (рис. 1) показывают, что темпы роста *S. divinum* опережают *S. fuscum*, особенно в годы с повышенным количеством осадков (табл. 1). За 12 лет наблюдений на гари были выявлены следы 5-ти палов разной интенсивности в апреле-мае 2012, 2014 и следующих подряд 2017–2019 гг., в зависимости от количества осадков в эти месяцы. Пирогенное поражение от палов вызывало в основном частичную гибель побегов и листьев кустарничков, выгорала ветошь травянистых и частично мхи, но только на гари. На контроле кустарнички и сфагновые мхи от палов не пострадали, но в 2017 и 2019 гг. обгорали высокие подушки до 70 см, образованные *P. strictum*. Эти последние три года, отличаются дефицитом весенних осадков (83–95 мм в апреле-мае), но весна 2016 г. была еще суше: 65 мм, а пала не было. Это дает возможность предположить, что именно повторные палы привели к снижению запасов живой фитомассы а значит и продукции сфагновых мхов на гари (рис. 1).

В моховом ярусе контроля также произошли сукцессионные изменения, проявившиеся в увеличении доли *S. divinum*, менее олиготрофного, чем *S. fuscum* и активном разрастании в сфагновых дернинах *P. strictum* (рис. 2).

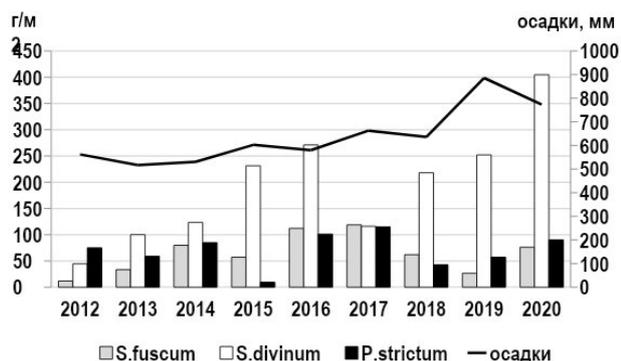


Рис.1. Динамика восстановления живых мхов на выгоревшем от пожара 2008 г. участке

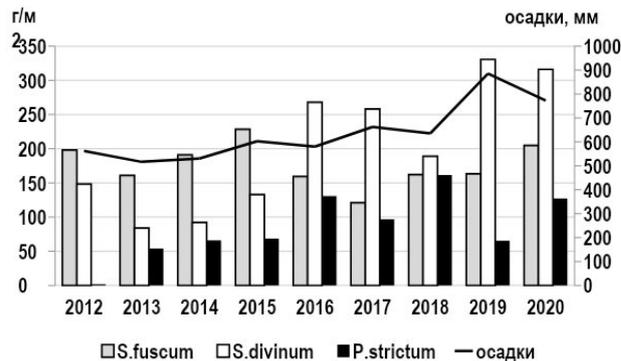


Рис. 2. Динамика живых мхов в покрове негоревшего участка болота

Таблица 1. Атмосферные осадки с.Бичевая, мм

Годы/ месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма
2020	3,9	4,6	17,3	17,7	115	178	82	213	82,3	84,6	31,1	7,7	$\frac{837^1}{772^2}$
2019	12	2	36,1	9,5	73,3	148	255	253	63,8	83,9	44	22	$\frac{1002}{886}$
2018	33	7,7	24,1	36,5	60,1	79,3	197	51,5	139	75,9	22,2	20	$\frac{746}{636}$
2017	16	14	10	49,5	42	223	123	117	79,9	28,2	24	27	$\frac{753}{663}$
2016	1,9	5,5	6	22,3	43,5	32,5	193	155	82,2	51,9	32,3	10	$\frac{636}{580}$
2015	21	39	55	38,4	103	139	44	117	110	51	8	9,5	$\frac{735}{602}$
2014	6,4	11	5,4	14	110	88,1	162	41	63	52	50	36	$\frac{639}{530}$
2013	3,6	9,8	34,7	46,7	68,7	92,3	72	179	22,8	35	26,3	16	$\frac{607}{516}$
2012	19	19	37,8	29,1	71	58	138	78,4	115	72,4	24,2	28	$\frac{690}{562}$

¹ годовая сумма (среднегоголетняя – 774,5 мм), ² сумма осадков за вегетационный период (апрель-октябрь, среднегоголетняя – 689 мм)

Таблица 2. Динамика фитомассы (Ф), мортмассы (М), интенсивности потоков вещества (NPP) фитоценоза и индексов – показателей функционирования на неповрежденном пожаром 2008 года участке (А) и на гари (Б), г/м²·год⁻¹, абс.- сух.

Показатели	Участок	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Средние
Ф	А	972	1584	1050	1342	1445	1175	1130	1349	1227	1253
	Б	1076	2412	1513	2237	1998	1395	1586	1779	1705	1745
М	А	2776	3484	3432	4956	4602	4433	4268	4191	4857	4111
	Б	4034	6377	6073	4165	6166	4102	4413	4420	4644	4933
NPP	А	524	643	671	670	690	484	560	552	576	597
	Б	963	1358	967	975	1028	917	1003	830	817	984
Ф/М	А	0,35	0,45	0,31	0,27	0,31	0,27	0,26	0,32	0,25	0,31
	Б	0,27	0,38	0,25	0,54	0,32	0,34	0,36	0,4	0,37	0,36
Ф/NPP	А	1,85	2,46	1,56	2	2,09	2,43	2,02	2,44	2,13	2,11
	Б	1,11	1,77	1,56	2,29	1,94	1,52	1,58	2,14	2,09	1,78
NPP/Ф	А	0,54	0,4	0,64	0,5	0,48	0,41	0,49	0,41	0,47	0,48
	Б	0,89	0,56	0,64	0,44	0,51	0,66	0,63	0,47	0,48	0,59
M/NPP-	А	5,3	5,4	5,1	7,4	6,7	9,2	7,6	7,6	8,4	7
	Б	4,2	4,7	6,3	4,3	6	4,5	4,4	5,3	5,7	5

В таблице 2 приведены данные сравнения динамики основных показателей биотического круговорота пирогенной сукцессии и контроля в понимании наших классиков изучения функционирования фитоценозов (Базилевич, Титлянова, 2008).

Все 9 лет наблюдений запасы живой фитомассы на гари превышали таковые на контроле. Самую большую долю в среднем имеют кустарнички (на гари 36% – контроле 33%), причем подземная фитомасса у них составляет $74 \pm 1,9\%$ от надземной. Доля трав в общей живой фитомассе на контроле 12%, на гари из-за разрастания пушицы больше – 21%. Запасы мортмассы, в состав которой входят: опад кустарничков, мертвые корни сосудистых и очес сфагновых и политриховых мхов в горизонте 0–30 см, на гари тоже как правило выше. На контроле запас мортмассы увеличивается с 2015 г. за счет *P. strictum*. На гари происходит резкое снижение мортмассы после палов 2014 и 2017 гг. Но особенно большой негативный эффект оказывают палы на продукцию фитоценоза на гари: в 2014 году NPP ниже почти в полтора раза по сравнению с предыдущим годом, в 2017 г. она тоже ниже среднего девятилетнего показателя, хотя она создается здесь в основном сосудистыми растениями и пирогенный фактор ее стимулирует. Самая низкая NPP на гари в 2019–2020 гг. в основном из-за переувлажнения, неблагоприятного для кустарничков. Средняя за 9 лет наблюдений NPP на гари больше, чем на контроле на 24%, за счет сосудистых растений. Несмотря на значительно более высокую NPP на гари, средний показатель мортмассы всего на 10% отличается от такового

на контроле, что говорит об усилившихся темпах деструкции МОВ.

Показатели отношения Ф/М в определенной мере отражают интенсивность потоков, на которые влияют скорость разложения Ф и М. После пала 2014 года в следующем 2015 г. интенсивность потоков увеличивается в 2 раза, в 2017–2019 гг. она также выше, чем на контроле. Индекс отношения Ф/NPP показывает, как быстро происходит оборот углерода, другими словами: за какое время NPP создает запас равный Ф (Базилевич, Титлянова, 2008). На гари время оборота как правило меньше, чем на контроле (табл. 2). По данным Н. П. Косых для ненарушенных мезотрофных болот южной и средней тайги (56, 55°с.ш.) этот индекс равен 2,4 (Автореферат, 2003; Наумов и др., 2009). На заторможенность обменных процессов указывает и удельная скорость процесса (NPP/Ф), в среднем она выше на гари за счет увеличения NPP сосудистых растений. На контроле этот показатель близок к тому (0,49), который можно получить, используя данные фитомассы и NPP на низком рьяме Бакчарского стационара (Головацкая, 2009). Наконец, индекс отношения М/NPP, предложенный в свое время Н. И. Базилевич, говорит о большей заторможенности скорости биотического круговорота на контроле, чем на гари.

Двенадцатилетние наблюдения динамики функционирования показывают, что пирогенная сукцессия на гари продолжается, палы ее пролонгируют. О полном восстановлении сфагнового покрова можно будет сказать только после восстановления допозарной структуры торфогенного горизонта (акротельма).

1. Базилевич Н. И., Титлянова А. А. 2008. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 376 с.
2. Буренина Т. А. 2006. Изменение запасов надземной фитомассы и эмиссии углерода при пожарах на лесоболотных комплексах о. Сахалин. // Вестник СВНЦ ДВО РАН, №2, с. 75–85.
3. Головацкая Е. А. 2009. Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири. // Журнал СФУ Биология, т. 2, № 1, с. 38-53.
4. Завалишин Н. Н. 2017. Моделирование динамики биотического круговорота в болотных ландшафтах южной и средней тайги Западной Сибири. // Материалы межд. конф-и «Углеродный баланс болот Западной Сибири в контексте климата» (Ханты-Мансийск, 19-29 VI). Томск, с. 57-59.
5. Наумов А. В., Косых Н. П. 2009. Паршина Е. К., Артымук С. Ю. Верховые болота лесостепной зоны, их состояние и мониторинг. // Сибирский экологический журнал, №2, с. 251-259.
6. Малышева Т. В. 1970. К методике разграничения живых и отмерших частей у мхов при учете их фитомассы. // Ботанический журнал, т. 55, № 5, с. 704–709.
7. Косых Н. П. 2003. Болотные экосистемы таежной зоны Западной Сибири: фитомасса и продукция. Автореферат диссертации, к.б.н. 23 с.
8. Прозоров Ю. С. 1989. Эндодинамическое развитие болот Приамурья. // Тез. докл. Всесоюзного семинара-экскурсии «Структура и развитие болотных экосистем и реконструкций палеогеографических условий» Таллин, с. 96-99.
9. Turetsky MR, Benscoter BW, Page S, Rein G, van der Werf GR, Watts A. 2015. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nat. Geosci.* V. 8 (1). P. 11–14. <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>.

ПРЕДПОСЫЛКИ И СЛОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ ЕДИНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО-НАРУШЕННЫХ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ

THE PREREQUISITES AND COMPLEXITIES OF DEVELOPING A UNIFIED METHODOLOGY FOR STUDYING THE BIOGEOCHEMICAL CARBON CYCLE OF NATURAL AND ANTHROPOGENICALLY DISTURBED MIRE ECOSYSTEMS OF RUSSIA

Ю.В. Куприянова¹, Е.Д. Лапшина¹, А.Ф. Сабреков¹, А.В. Ниязова¹, Е.А. Заров¹, Д.В. Ильясов¹, Н.В. Филиппова¹, А.А. Каверин¹, О.Л. Кузнецов², С.А. Кутенков², В.Л. Миронов², Н.Г. Коронатова³, Е.К. Вишнякова³, Е.А. Головацкая⁴, Е.Э. Веретенникова⁴, Г.Г. Суворов⁵, Т.В. Глухова⁶
Iu.V. Kupriyanova¹, E.D. Lapshina¹, A.F. Sabrekov¹, A.V. Niyazova¹, E.A. Zarov¹, D.V. Il'yasov¹, N.V. Filippova¹, A.A. Kaverin¹, O.L. Kuznecov², S.A. Kutenkov², V.L. Mironov², N.G. Koronatova³, E.K. Vishnyakova³, E.A. Golovackaya⁴, E.E. Veretennikova⁴, G.G. Suvorov⁵, T.V. Gluhova⁶

¹ Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)

² Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск, Россия)

³ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия)

⁴ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

⁵ Институт Проблем Экологии и Эволюции им. А.Н. Северцова РАН (г. Москва, Россия)

⁶ Института лесоведения РАН (с. Успенское, Россия)

E-mail: y_kupriyanova@ugrasu.ru

Торфяные болота занимают около 3% мировой площади суши и составляют более 50% площади водно-болотных угодий во всем мире (Rydin and Jeglum, 2006). Эти болота характеризуются водонасыщенным слоем почвы, состоящим не менее чем на 30% (по сухой массе) из органического материала и минимальной толщиной торфа от 30 см (Joosten and Clarke, 2002). Большая их часть расположена в северном полушарии (около 80-90% - в бореальной и субарктической зонах (~ 45–70°N) (Frolking et al. 2011), при этом значительное развитие началось примерно за 16 тыс. калиброванных лет до настоящего времени (Loisel et al., 2017). Более трети площади болот мира (Global..., 2022) и почти 40% болот Европы (Tanneberger et al., 2017) приходится на территорию России и составляют вместе с мелкооторфованными (мощность торфа менее 30 см) заболоченными землями 1/5 территории страны (3.69 млн км²) (Вомперский и др., 2011).

Торфяники во всем мире играют важную роль в предоставлении ряда экосистемных услуг, таких как поддержание биоразнообразия, регулирование водного баланса, формирование газового состава атмосферы, хранение углерода, и в

конечном итоге регулирование климата (Minasny et al., 2019). Запас углерода торфяных болот составляет от 113 до 612 Гт С, что эквивалентно примерно 5–20% мировых запасов углерода в почве, 15–72% атмосферного углерода и 18–89% глобальной биомассы земного углерода (Köchy et al., 2015). На нашу страну может приходиться от 1/5 (Вомперский и др., 2011) до 1/3 (Botch et al., 1995) углерода болот мира.

В естественных условиях торфяники являются поглотителями углерода, скорость накопления которого оценивается от 0,5 до 1 мм в год со времени последнего ледникового периода (Minasny et al., 2019). Изменение климата было признано серьезной угрозой для болот. Повышение температуры и перестройка гидрологии могут необратимо изменить биогеохимию и функции экосистем (Salimi et al., 2021). Помимо этого, торфяники на протяжении более 1000 лет находятся под давлением, вызванным деятельностью человека, такой как добыча сырья, выпас скота, изменение землепользования, пожары, строительство дорог и других линейных объектов и иные воздействия. Это приводит к полной их деградации и высвобождению углерода, хранящегося в торфе

в виде выбросов парниковых газов и переключение торфяника из поглотителя в источник углерода (Narendra et al., 2018). В мире для сельского и лесного хозяйства, добычи торфа было осушено 10% мировых торфяников. В России эта цифра примерно в 2 раза ниже, однако в ряде регионов европейской территории России было осушено 50% и более (Сирин, 2022). Осушенные торфяники выделяют в результате микробного окисления торфа и торфяных пожаров ~2 Гт CO₂, что составляет ~5% всех антропогенных эмиссий парниковых газов (Joosten et al., 2016) и без принятия мер этот объем выбросов может увеличиться до 12-41% в 2020–2100 гг. (Leifeld et al., 2019).

Поскольку торфяники представляют собой сложные экогидрологические системы, характеризующиеся рядом специфических особенностей, затрудняющих процесс их изучения, по-прежнему существуют большие неопределенности в оценках запасов углерода и плохое понимание его динамики в пространственно-временных масштабах (Yu, 2012). Ниже перечислены эти особенности торфяных болот и связанные с ними неопределенности.

Особенности: 1) широкое разнообразие структурно-типологической организации болот, представленное на разных пространственных уровнях: болотных систем (комплексов болот), массивов (болот), микроландшафтов (фаций), микроформ (кочка, гряда, мочажина), элементов мозаики растительности. На всех уровнях это многообразие функционально проявляется через сложную иерархию взаимосвязей между компонентами, процессами и явлениями фито-, педо-, гидросферы (Lapshina, Kupriianova, 2024); 2) удаленность расположения (в значительной степени от антропогенного воздействия) и охват больших изолированных территорий торфяных массивов делает их труднодоступными для непрерывных полевых исследований. Помимо этого, торфяные болота – хрупкие экосистемы, их поверхность крайне подвержены нарушению целостности покрова (Malenovsky et al., 2015); 3) углеродный цикл торфяных экосистем сложен и включает множество компонентов, а двойное влияние торфяников на потоки углерода (активное поглощение и секвестрация торфом, с одной стороны, и высокие выбросы CO₂ и CH₄ с другой) затрудняет оценку роли торфяников (Golovatskaya et al., 2024); 4) различные процессы в углеродном цикле торфяников обычно происходят в разномасштабных временных рамках - от нескольких часов и лет (потоки углерода) до сотен и тысяч лет (запасы углерода) (Панов, Галанина, 2021).

Неопределенности: 1) разнообразные точки зрения на определение «болото», сложность и запутанность подходов к типологии и классификации болот (Lapshina, Kupriianova, 2024);

2) отсутствие надежного метода количественного определения мощности залежи и объемной плотности торфа (Silvestri et al., 2019). 3) высокая изменчивость в оценке глобальной площади торфяников (от 1 до 4,6 миллиона км²). Эта неопределенность в основном связана с грубым пространственным масштабом глобальных почвенных карт. Кроме того, большинство глобальных оценок торфяников основаны на приблизительных национальных реестрах и отчетах, в которых используются устаревшие данные (Minasny et al., 2019). 4) хотя крупные болотные массивы считаются устойчивыми к наблюдаемым изменениям климата до сих пор не достигнуто общее согласие относительно направления и масштабов его воздействия на способность поглощать углерод в торфяниках (Loisel et al., 2017; Golovatskaya et al., 2024); 5) проблема повторного заболачивания и восстановления торфяных болот представляет собой также сложную задачу, поскольку имеет социальные, политические, экономические, экологические и технические аспекты (Fleming et al., 2021).

Первоначально акцент в исследованиях болот был сделан на фундаментальные экологические вопросы. Ранние исследования были сосредоточены на вопросах биоразнообразия. За последние 50 лет произошел серьезный сдвиг в сторону глубокого понимания функционирования болотных экосистем (Панов, Галанина, 2021). Важным элементом смены парадигмы в последние годы стало увеличение темпов восстановления водно-болотных угодий в различных масштабах и для различных целей (Maltby, 2022). За десятилетия исследований было разработано множество наблюдательных, экспериментальных и аналитических подходов для понимания и количественной оценки запасов и потоков С в болотах. С каждым годом появляется все больше комплексных данных по торфяникам на разных уровнях (Loisel et al., 2017; Bansal et al., 2023). В последние десятилетия научный интерес к болотным экосистемам определяется не только их климаторегулирующей и средообразующей функцией в глобальном масштабе, но и прикладными задачами, связанными с оценкой экологических и социально-экономических последствий их развития (Golovatskaya et al., 2024).

В России в рамках одного из направлений Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) «Российская система климатического мониторинга» (Углеродное регулирование..., 2023) реализуется разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов (РИТМ углерода. 2024. URL: <https://ritm-c.ru/>) в наземных экосистемах. Способность торфяных болот улавливать углерод рассматривается

в проекте как один из потенциальных источников управления углеродно-сбалансированными ландшафтами и предоставления экосистемных услуг в направлении смягчения изменения климата. Чтобы иметь возможность широко реализовать эту инициативу необходимо формализовать и стандартизировать научные и практические аспекты изучения болотных экосистем на национальном уровне. Поэтому первоочередной задачей создания национальной сети мониторинга бюджета углерода является разработка единых методик оценки пулов и потоков углерода в наземных экосистемах, в том числе болотных.

Разработанные методические рекомендации совмещают два подхода оценки баланса климатически активных веществ, предлагаемых межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), для максимально корректного отражения влияния болот на климат за счёт поглощения и выделения ими парниковых газов. В них детально и поэтапно раскрываются методические аспекты по сбору данных дистанционного зондирования, наземных данных для оценки запасов углерода всех компонентов болотных экосистем (древесный ярус, напочвенный покров, деятельный торфяной

слой), измерению удельных потоков парниковых газов, оценки выноса углерода с латеральным стоком с учетом их структурной и типологической организации. Для каждого подхода уточняется какой компонент углеродного цикла болот исследуется, его пространственная и временная репрезентативность и ограничения. Описываются практические соображения, например, где и когда обычно используется подход, кто может проводить измерения (опыт, требования к обучению) и как они проводятся, включая соображения по сложности и стоимости оборудования. Наконец, рассматривается, помимо ключевых компонентов, вспомогательные измерения, которые улучшают интерпретацию результатов и облегчают в дальнейшем разработку моделей. В приложении приводятся бланки и протоколы для измерения всех вышеуказанных компонентов болотных экосистем.

Таким образом, комплексный и междисциплинарный подход, описанный в методических рекомендациях, позволит повысить качество и согласованность сбора данных, а главное поможет уменьшить неопределенность и разработать стратегии управления для использования болот на национальном уровне.

Работа выполнена при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов...» (рег. № 123030300031-6).

1. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А. и др. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. 2011. № 5. С. 3–11.
2. Панов В. В., Галанина О. В. Полуторавековая дискуссия об определении болота в России // Известия Русского географического общества. 2021. Т. 153. № 2. С. 72-90.
3. Сирин, А. А. Болота и антропогенно-измененных торфяники: углерод, парниковые газы, изменение климата // Успехи современной биологии. 2022. Т. 142. №. 6. С. 560-577.
4. Углеродное регулирование в Российской Федерации. Министерство экономического развития РФ. 2023. 20 с.
5. Bansal S., Creed I. F., Tangen B. A., Bridgham S. D., Desai A. R., Krauss K. W., Zhu X. Practical guide to measuring wetland carbon pools and fluxes // Wetlands. 2023. V. 43. №. 8. P. 105.
6. Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // Glob. Biogeochem. Cycles. 1995. V. 1 (9). P. 37–46.
7. Fleming A., Agrawal S., Fransisca Y., Graham L., Lestari S., Mendham D., Yuwati T. W. Reflections on integrated research from community engagement in peatland restoration // Humanities and Social Sciences Communications. 2021. V. 8. №. 1. P. 1-11.
8. Frolking S, Talbot J, Jones MC, Treat CC, Kauffman JB, Tuittila ES, Roulet N. Peatlands in the Earth's 21st century climate system // Environmental Reviews. 2011. V. 19. №. NA. P. 371-396.
9. Global Peatland Database. Greifswald Mire Centre. 2022. <https://greifswaldmoor.de/global-peatland-databaseen.html>
10. Golovatskaya E. A., Veretennikova E. E., Dyukarev E. A. Greenhouse Gas Fluxes and Carbon Sequestration in the Oligotrophic Peat Soils of Southern Taiga in Western Siberia // Eurasian Soil Science. 2024. V. 57. №. 2. P. 210-219.
11. Harendra K. M., Lamentowicz M., Samson M., Chojnicki B. H. The role of peatlands and their carbon storage function in the context of climate change // Interdisciplinary approaches for sustainable development goals: Economic growth, social inclusion and environmental protection. 2018. P. 169-187.
12. Joosten H., Clarke D. Wise use of mires and peatlands // International mire conservation group and international peat society. 2002. V. 304.

13. Joosten H., Sirin A., Couwenberg J. et al. The role of peatlands in climate regulation // Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice. 2016. V.66 P. 63–76.
14. Köchy M., Hiederer R., Freibauer A. Global distribution of soil organic carbon–Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world //Soil. 2015. V. 1. №. 1. P. 351-365.
15. Lapshina E.D., Kupriianova Iu.V.. Spatio-temporal structure of mire landscapes: basic concept and approaches to classification in national mire science // Environmental dynamics and global climate change. 2024 (in press).
16. Leifeld J., Wüst-Galley C., Page S. Intact and managed peatland soils as a source and sink of GHGs from 1850 to 2100 // Nat. Clim. Change. 2019. V. 9. P. 945–947.
17. Loisel J., van Bellen S., Pelletier L., Talbot J., Hugelius G., Karran D., Holmquist, J. Insights and issues with estimating northern peatland carbon stocks and fluxes since the Last Glacial Maximum //Earth-Science Reviews. – 2017. V. 165. P. 59-80.
18. Malenovský, Z., Turnbull, J. D., Lucieer, A., & Robinson, S. A. (2015). Antarctic moss stress assessment based on chlorophyll content and leaf density retrieved from imaging spectroscopy data //New phytologist. 2015. V. 208. №. 2. P. 608-624.
19. Maltby E. The wetlands paradigm shifts in response to changing societal priorities: A reflective review //Land. 2022. V. 11. №. 9. P. 1526.
20. Minasny B., Berglund Ö., Connolly J., Hedley C., de Vries F., Gimona A., Widyatmanti W. Digital mapping of peatlands–A critical review //Earth-Science Reviews. 2019. V. 196. P. 102870.
21. Rydin H., Jeglum J. The Biology of Peatlands // Oxford University Press, Oxford. 2006
22. Salimi S., Almuktar S. A., Scholz M. Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands //Journal of Environmental Management. 2021. V. 286. P. 112160.
23. Silvestri S., Knight R., Viezzoli A., Richardson C. J., Anshari G. Z., Dewar N., Comas X. Quantification of peat thickness and stored carbon at the landscape scale in tropical peatlands: a comparison of airborne geophysics and an empirical topographic method //Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2019. V. 124. №. 12. P. 3107-3123.
24. Tanneberger F., Tegetmeyer C., Busse S. et al. The peatland map of Europe //Mires and Peat. 2017. V. 19. P. 1–17.
25. Yu Z. C. Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review //Biogeosciences. 2012. V. 9. №. 10. P. 4071-4085.

ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ БОЛОТНОЙ СИСТЕМЫ «КОЙВИЛАМБИСУО» (ЮЖНАЯ КАРЕЛИЯ)

PHYTOMASS CARBON POOLS OF KOIVULAMBISUO MIRE SYSTEM (SOUTH KARELIA)

*С.А. Кутенков, О.Л. Кузнецов, Л.В. Канцерова, В.Л. Миронов, П.А. Игнашов,
Е.Л. Талбонен, В.С. Васюта*
*S.A. Kutenkov, O.L. Kuznetsov, L.V. Kantserova, V.L. Mironov, P.A. Ignashov,
E.L. Talbonen, V.S. Vasyuta*

¹ Институт биологии – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск, Россия)
e-mail: effort@krc.karelia.ru

Болотная система Койвуламбисуо (61,80° с.ш., 33,56° в.д., подзона средней тайги) имеет сложную структуру растительного покрова, включает болотные массивы южнокарельского варианта аапа болот, грядово-мочажинные верховые массивы, а также переходные травяно-сфагновые и облесенные участки разной трофности.

Исследования велись в соответствии с Методическими рекомендациями ... (2023). Запасы углерода в фитомассе определялись для трех типов болотных участков: аапа, верховых сфагновых грядово-мочажинных (ГМК) и верховых сосново-кустарничково-пушицево-сфагновых (СКС). На каждом типе участков заложено по 3 пробные площади размером 50X50 м, с 8–12 точками отбора на каждой. Материал надземной фитомассы сосудистых растений собран методом укосов, древостоя – модельных деревьев, мхов и подземной фитомассы – монолитов, продукция сфагновых мхов определена по методике годового прироста, проведен сплошной пересчет древостоя. Определение содержания углерода в образцах проведено на анализаторе CN802 VELP Scientifica.

Результаты исследований приведены в таблице. Наибольшие запасы углерода живой фитомассы сосредоточены в подземных частях растений. В особенности выделяются аапа, где более 90% углерода живой фитомассы содержат подземные органы. В напочвенном покрове всех типов участков запас в моховом ярусе выше, чем в травяно-кустарничковом. Наибольшую долю пул углерода мхов имеет в ГМК (27% от общего), трав и кустарничков – в СКС (7%). Значимые запасы углерода в древостое имеют только СКС (18%), где они соответствуют запасу углерода мхов. Во всех типах участков запасы углерода в мортмассе верхних 40 см залежи заметно выше суммар-

ных запасов в живой фитомассе. Основную долю мортмассы составляют остатки сфагновых мхов. Для мхов также характерна наибольшая первичная годовая аккумуляция углерода (NPP).

Запас и годовая аккумуляция углерода, тС/га, пространственно взвешенное среднее по типам участков.

Фракция	Аапа	ГМК	СКС
Запас			
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	2,42	4,57	4,46
Мхи	1,40	3,52	2,90
сосудистые растения	0,67	0,73	1,15
ветошь + опад	0,35	0,32	0,40
Подземная фитомасса, 0–40 см, сумма	60,28	70,39	72,47
очес (остатки мхов)	19,53	47,55	55,85
живые части сосудистых растений	21,56	8,62	9,04
мертвые части сосудистых растений	4,65	13,33	6,64
опад	0,37	0,89	0,94
неопределяемая мортмасса	14,16	–	–
Годичная аккумуляция			
Ветки и хвоя сосны	<	<	0,04
Сосудистые растения, надземная часть	0,64	0,48	0,57
Мхи	0,95	1,56	1,64

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.

1. Методические рекомендации по оценке углеродных пулов и потоков в болотных экосистемах России. Часть 1. Полевые исследования. 2023. Ханты-Мансийск. 62 с.

СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ ВОДОРАЗДЕЛЬНЫХ БОЛОТ СЕВЕРА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

CARBON CONTENT AND RESERVES IN PEAT DEPOSITS OF WATERSHED MIRES OF THE NORTH OF THE MIDDLE-RUSSIAN UPLAND

О.А. Леонова¹, Е.М. Волкова¹, Д.В. Зацаринная^{1,2}
Leonova O.A.¹, Volkova E.M.¹, Zatsarinnaya D.V.^{1,2}

¹Тулский государственный университет (г. Тула, Россия)

²ГУК ТО «Тулское музейное объединение» (г. Тула, Россия)

e-mail:ya.oly2012@yandex.ru

Болотные экосистемы являются одними из основных накопителей углерода атмосферы. В атмосфере углерод находится в виде углекислого газа и его депонирование осуществляется болотными растениями с последующей аккумуляцией в торфяных отложениях (Holmquist et al., 2014; Ефремова, 2016). Накопление углерода болотами разных типов происходит с разной интенсивностью, что обеспечивает формирование разного запаса углерода в залежах (Залесов, 2021) и свидетельствует о различном вкладе в углеродный обмен с атмосферой. Оценка роли разных типов болот в депонировании углерода является актуальной научной задачей.

Среднерусская возвышенность является слабозаболоченной территорией (0,5%) (Волкова, 2018). Тем не менее, здесь сформированы болота разных типов. Среди них специфическими для региона являются водораздельные болота, относящиеся к разным классам типов, которые стали объектами данного исследования.

1. Класс типов – Террасные и склоновые водораздельные болота на зандровых и моренных отложениях в суффозионных депрессиях. В этом классе типов модельным является болото Клюква, которое относится к типу сосново-сфагновые болота, группе типов олиготрофные болота (Волкова, 2018). Болото сформировано в понижении на склоне водораздела в долине р. Ока вбореальный период голоцена (9370±100 кал. лет) и находится на южной границе распространения болот данного типа. Торфяная залежь целостная, мощностью 2,5 м и сформирована переходными и верховыми торфами. Питание бедными атмосферными осадками способствовало формированию олиготрофной растительности, которая представлена в центральной части грядово-мочажинным комплексом: на грядах сформированы сосново-пушицево-сфагновые сообщества, в мочажинах – осоково-сфагновые ценозы. По

окрайкам болота сформированы березово-пуши-

цево-сфагновые сообщества и осоково-сфагновая топь.

2. Класс типов – Водораздельные болота в карстово-суффозионных депрессиях. В данном классе типов болота отличаются по характеру водно-минерального питания, структуре и составу торфяных залежей, растительному покрову. В соответствии с этим, в данном классе типов выделены модельные болота, относящиеся к группам типов эвтрофные и олиготрофные. Болото Источек относится к типу березово-сфагновые болота, группе типов эвтрофные болота (Волкова, 2018). Болото сформировано в карстово-суффозионном понижении у д. Ясная Поляна в конце атлантического периода голоцена (6550±90 кал. лет) (Волкова и др., 2020). Торфяная залежь целостная, мощность 5 м и образована низинными торфами. Питание осуществляется поверхностным стоком и выклинивающимися грунтовыми водами, благодаря чему растительный покров сформирован эвтрофными березово-сфагновым и черноольховым ценозами. Болото Кочки относится к типу очеретниково-сфагновые болота, группе типов олиготрофные болота (Волкова, 2018). Болото сформировано в понижении у д. Кочки во второй половине субатлантического периода голоцена (1205±80 кал. лет). Торфяная залежь разорванная, мощность 5,5 м, состоит из придонной и сплавинной частей, разделенных линзой воды. Придонная часть образована низинными торфами, сплавинная – низинными и переходными торфами. Участие в питании атмосферных осадков способствует формированию мезотрофной растительности в центре сплавин, которая представлена очеретниково-сфагновыми сообществами, и эвтрофными ивово-травяными и камышовыми сообществами по крайкам.

Для оценки содержания и запасов углерода в торфяных залежах исследуемых болот торфяные образцы были отобраны в ходе бурения буром конструкции Инсторфа в наиболее

глубокой части болот, являющейся «генетическим центром». В образцах торфа определяли ботанический состав и степень разложения микроскопическим методом (Волкова, 2009), объемный вес (Chambers et al., 2016), зольность (ГОСТ 23740-2016) и содержание карбонатов (ГОСТ 34467-2018) гравиметрическим методом. Содержание органического вещества (ОВ) определяли по формуле: $ОВ = 100\% - \text{зольность} (\%) - \text{карбонаты} (\%)$. Для расчета содержания углерода (%) использовали значение органического вещества в единице объема торфа, которое умножали на массовую долю углерода, определенную с использованием CHNSO-анализатора LECO TruSpecMicro в Институте органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН. Зная содержание, рассчитывали запас углерода для каждого 10-см слоя торфяных залежей болот. Полученные данные послойно суммировали для определения запасов углерода на 1 м² болота. Для оценки запасов углерода в торфяной залежи каждого болота расчет проводили с учетом всей площади болота.

Анализ ботанического состава торфяных отложений показал, что болото Клюква сформировано верховыми и переходными торфами со степенью разложения 5-30%. Объемный вес таких торфов варьирует от 0,14 до 0,53 г/см³ и, в среднем, составляет 0,26 г/см³. Максимальные значения характерны для торфов с высоким содержанием древесных остатков. Доля органического вещества в единице объема составляет от 60 до 93,9%. Расчет содержания углерода показал, что параметр варьирует от 33,6% до 54,3%

(рис.). При этом, наиболее низкие показатели свойственны придонным образцам и верховым торфам с высоким содержанием сфагновых мхов. Содержание углерода увеличивается в переходных торфах с высокой долей древесных остатков – до 54%.

Торфяная залежь болота Кочаки разорванного типа и сформирована, в основном, низинными торфами со степенью разложения 10-25%. Верхний горизонт (0-10 см) образован сфагновым переходным торфом со степенью разложения 5-7%. Объемный вес низинных торфов варьирует от 0,06 до 0,3 г/см³ (в среднем, 0,11 г/см³), а переходного торфа - 0,15 г/см³. Наиболее низкие значения характерны для нижней части сплавины, сформированной травяным низинным торфом. Содержание углерода по профилю залежи варьирует в широких пределах: от 3,8% до 43,3% (рис.). Минимальные значения характерны для придонного слоя залежи, образованного гипновым торфом. Показатель увеличивается в сплавине до 43,3% в травяно-сфагновом низинном торфе (260-270 см) и, в среднем, по сплавине составляет 32,2%.

Залежь болота Источек целостная и сформирована низинными торфами со степенью разложения 20-45%. Объемный вес варьирует от 0,8 до 2,3 г/см³, наиболее высокие значения характерны для придонных слоев за счет наличия древесных остатков в составе торфа. Содержание углерода по профилю залежи варьирует от 0,3% до 42,6% и, в среднем, составляет 29,7% (рис.). При этом, минимальные значения характерны для нижних слоев залежи, сформированных гип-

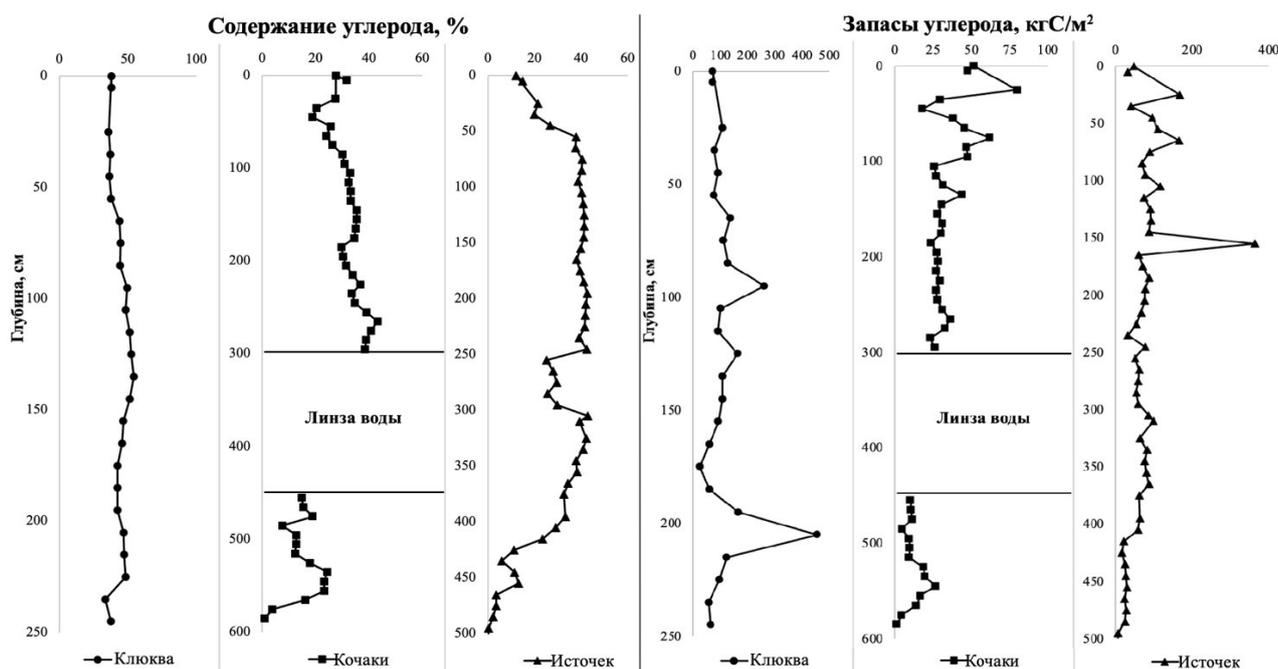


Рис. Содержание и запасы углерода на водораздельных болотах севера Среднерусской возвышенности

новым низинным торфом. Показатель увеличивается до 42,6% в травяно-сфагновых низинных торфах.

На основании содержания углерода проводили расчет запасов углерода в торфяных залежах болот. По профилю торфяной залежи болота Клюква запас углерода в каждом десятисантиметровом слое, в среднем, составил 116,4 кгС/м² и изменяется от 57,1 до 456,4 кгС/м². В придонном слое запасы углерода составили 57,1 кгС/м², что сопоставимо с низким объемным весом (0,17 г/см³) (рис.). Показатель увеличивается в сфагновом (90-100 см) и древесно-сфагновом (200-210 см) переходных торфах (262,2-456,4 кгС/м²), что коррелирует с высокими показателями объемного веса (0,53-0,97 г/см³) и низкими значениями зольности (4-6%). Высокое содержание углерода свидетельствует о значительной роли указанных палеосообществ в депонировании углерода.

В сплавинном болоте Кочаки запасы углерода изменяются в широких пределах от 4,5 до 80 кгС/м², составляя, в среднем, 27,8 кгС/м² (рис.). Для придонных образцов характерны низкие значения, что связано с высоким содержанием зольных элементов (70-78%). На глубине 450-520 см, где представлены гипновые торфа, также отмечены низкие значения запасов углерода – 9,5-10,3 кгС/м², что соответствует значениям объемного веса торфов (0,07 г/см³). Увеличение запасов углерода отмечено в сплаvine на глубине 20-30 и 70-80 см, где сформированы травяно-сфагновые торфа с объемным весом 0,24-0,3 г/см³.

Запасы углерода в торфяной залежи болота Источек варьируют от 5,8 до 363 кгС/м², и в среднем по залежи составляют 71,1 кгС/м² (рис.). Наиболее низкие показатели свойственны придонным образцам, что коррелирует с высоким содержанием зольных элементов, привносимых подстилающей породой – 83-85%. Высокие запасы углерода по профилю залежи отмечены в

древесно-сфагновом, травяно-сфагновом и осоковом торфах, где показатели составляют 109,6-363,1 кгС/м². Объемный вес таких торфов – 0,3-0,9 г/см³.

Общий запас углерода на 1 м² торфяных залежей болот отражает роль таких экосистем в аккумуляции углерода. Наиболее высокие значения этого показателя характерны для водораздельного болота Источек – 3556,4 кгС/м². В торфяной залежи болота Клюква запасы углерода несколько ниже – 2909,8 кгС/м². Сплавинное болото Кочаки является наиболее «молодым» и запасы углерода в разорванной залежи весьма низкие – 1224,9 кгС/м², из них в сплавинной части запас составляет 1057 кгС/м², а в придонной – 168 кгС/м².

Расчет запасов углерода с учетом площади болот показал, что наиболее высокий показатель аккумулированного углерода характерен для торфяной залежи олиготрофного болота Клюква – 24 тыс. тС. На эвтрофном болоте Источек, несмотря на большую мощность торфяной залежи, запас углерода несколько меньше и составляет 20 тыс. тС. Наименьший запас углерода характерен для наиболее «молодого» олиготрофного болота Кочаки с разорванной структурой торфяной залежи – 1223 тС.

Таким образом, полученные результаты исследования отражают специфику накопления углерода на разных типах болот. Общий запас углерода в торфяной залежи зависит от ботанического состава, структуры и мощности залежи, возраста болота и экологических условий. Так, высокий запас углерода, в целом, характерен для сосново-сфагновых болот олиготрофной группы типов, относящихся к классу типов Террасные и склоновые водораздельные болота. Наиболее низкие значения запаса углерода отмечены для очеретниково-сфагновых болот олиготрофной группы типов, относящихся к классу типов Водораздельные болота в карстово-суффозионных депрессиях.

1. Волкова Е.М. 2009. Методы изучения болотных экосистем (учебное пособие). Тула: Гриф и К, 94 с.
2. Волкова Е.М. Болота Среднерусской возвышенности: генезис, структурно-функциональные особенности и природоохранное значение: Авто- реф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2018. 46 с.
3. Волкова Е.М., Новенко Е.Ю., Юрковская Т.К. 2020. Возраст болот Среднерусской возвышенности // Известия Российской академии наук. Серия географическая. Т. 84. № 4. С. 551-561.
4. ГОСТ 23740—2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ
5. ГОСТ 34467-2018. Грунты. Методы лабораторного определения содержания карбонатов.
6. Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. 2016. Расчетный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сибирский лесной журнал. №6. С. 73-83.
7. Залесов С.В. 2021. Роль болот в депонировании углерода // Международный научно-исследовательский журнал. No 7. С. 6–9. doi: 10.23670/IRJ. 2021.109.7.033
8. Chambers Lisa G., Ping Chin Yu, Gabriel M. F., Christopher B. G., Herndon E. M., Long D.T., Lyons W.B., Macpherson G.L., McElmurry S.P., McLean C.E., Moore J., Moyer R.P., Neumann K., Nezat C.A., Soderberg K., Teutsch N., Widom E. 2016. Developing the scientific framework for urban geochemistry // L.G. Chambers et al. / Applied Geochemistry. V. 67. P. 1-20.
9. Holmquist J. R., MacDonald G. M., Gallego-Sala A. 2014. Peatland initiation, carbon accumulation, and 2 ka depth in the James Bay Lowland and adjacent regions // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. V. 46. P. 19–39. doi: 10.1657/1938-4246-46.1.19

ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА БОЛОТНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ МОРДОВСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

CARBON DEPOSITION BY MIRES OF THE MORDOVIAN NATURE RESERVE

*Е.А. Макарова¹, Н.Г. Мазей¹, А.Е. Шатунов², А.С. Прокушкин^{3,4}, Е.Ю. Новенко²
Makarova E.A.¹, Mazei N.G.¹, Shatunov A.E.², Prokushkin A.S.^{3,4}, Novenko E.Yu.²*

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

² Институт географии РАН (г. Москва, Россия)

³ Институт леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН, ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН, (г. Красноярск, Россия)

⁴ Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

e-mail: katmak2001@gmail.com

Депонирование углерода в торфяных болотах напрямую связано с глобальными климатическими изменениями, что способствует высокой актуальности работ подобной тематики. На территории России отмечена высокая неравномерность исследований запасов и аккумуляции углерода болотными экосистемами. Европейская часть России изучена слабее по сравнению с Сибирскими регионами. В данной работе представлены результаты исследования депонирования углерода в голоцене двумя болотными комплексами разного генезиса, расположенных на территории Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Смидовича.

Район исследований находится в Темниковском районе на северо-западе республики Мордовия. Территория заповедника представлена пологоволнистой водно-ледниковой равниной, через которую проходят глубоковрезанные долины реки Мокши и ее притоков. Заповедник расположен в умеренно-континентальной области умеренного климата. Изучаемая территория находится на южной границе зоны хвойно-широколиственных лесов. Для Мордовского заповедника характерно большое количество болот, растительность, флора и развитие которых хорошо изучены, однако исследований по запасам углерода в болотных комплексах не проводилось.

В качестве объектов исследования были выбраны два болота – Столбовое и Жегаловское-3, расположенные в северной части заповедника. Болото Столбовое сформировалось в карстовом понижении, с перепадом высот относительно поверхности окружающей равнины около 4 м. Окрайка болота занята редкостойным ивовым сфагновым березняком. В центральной части болота сочетаются кустарничково-осоково-сфагновый и вейниково-моховый фитоценозы. Болото Жегаловское-3 занимает древнеэоловую

котловину выдувания на 3 надпойменной террасе реки Мокши. Его растительность представлена багульниковым пушицево-сфагновым фитоценозом с соснами и березами.

В ходе полевых работ в июле 2020 г. было проведено бурение торфяных залежей изучаемых болот с помощью бура Сукачева Eijkelkamp. Мощности торфяных залежей составили: Столбовое – 240 см и Жегаловское-3 – 195 см. В ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН проведено определение абсолютного возраста образцов торфа (по 3 образца для каждого болота). Калибровки радиоуглеродных дат выполнены в программе Calib 8.2 с использованием калибровочной кривой IntCal20. Модели роста отложений построены в программе Bacon программной среды R.

Для каждого из исследуемых болот были выполнены следующие виды анализов с интервалом отбора образцов торфа 2-4 см: определены потери при прокаливании, содержание гигроскопической влаги, объемной плотности торфа (ГОСТ 11306-2013), степени гумификации торфа (Chambers et al., 2010), анализ ботанического состава торфа (Домбровская, 1959). Анализ содержания углерода проведен в Институте географии РАН на анализаторе Vario Isotope Cube с модулем IRMS IsoPrime100 (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany). Скорость накопления углерода ($г\ С/м^2$ в год) рассчитана через произведение удельной плотности сухой массы торфа ($г/см^3$), содержания углерода (%) и прироста торфа (год/см), вычисленного по модели роста отложений (Chambers et al., 2010).

Согласно данным радиоуглеродного датирования, болото Столбовое начало формироваться около 3 тыс. кал. л. н. (тысяч калиброванных лет назад) Потери при прокаливании торфа

оставались стабильными (90-98%), за исключением интервала 29-37 см, где произошло снижение до 75-80%. Степень гумификации изменялась от 0,1 до 0,6, причем с глубины 140 см наблюдается

ее снижение вверх по разрезу. Удельная плотность сухой массы торфа составляет 0,04-0,15 г/см³, возрастая в верхней части торфяной залежи, что связано с привнесом минеральных частиц (рис. 1а).

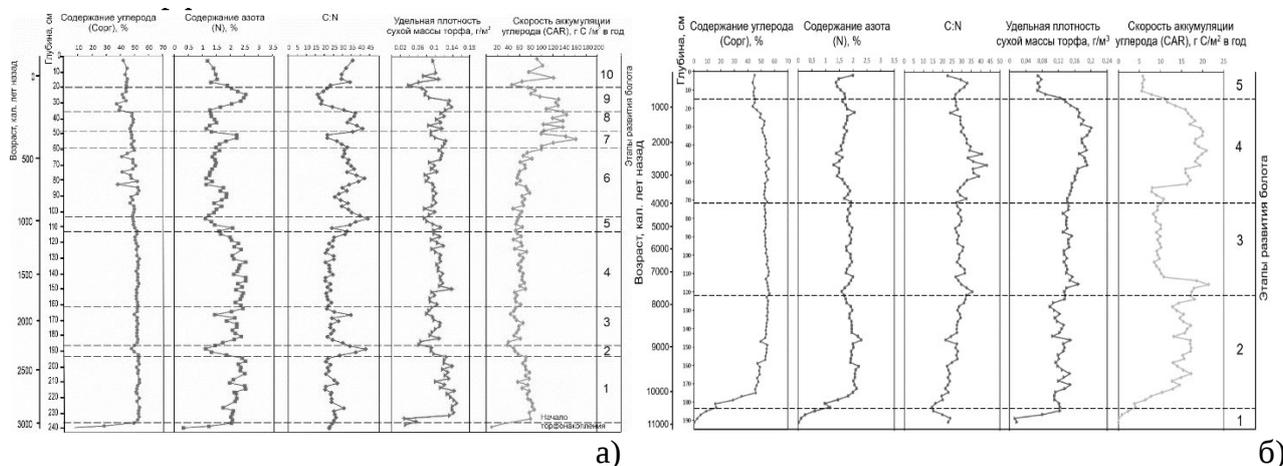


Рис. 1. Свойства торфа болот: а) Столбовое, б) Жегаловское-3.

По результатам ботанического анализа торфяной залежи болота Столбовое, было выделено 10 этапов его развития. На 1 этапе (зона 1, 240-200 см, 3-2,5 тыс. кал. л. н.) происходило заболачивание карстовой воронки через переувлажненный осоковый березняк, который постепенно перешел в березовое осоково-травяное болото. На 2 этапе (зона 2, 200-185 см, 2,5-2,2 тыс. кал. л. н.) в растительном покрове болота господствовали сфагновые мхи, которые затем сменились на осоки и пушицу при участии других трав (зона 3, 185-155 см, 2,2-1,76 тыс. кал. л. н.). Содержание Corg резко возрастает в основании торфяной залежи с 7 до 52,3% и в интервале глубин 236-155 см содержание углерода составляет 49,9-53,3%, содержание азота 2,0-2,6%. Соотношение C:N составляет 20:1-25:1, что указывает на условия богатого минерального питания.

На следующем этапе (зона 4, 155-115 см, 1,76-1,13 тыс. кал. л. н.) произошло зарастание болота сосновым древостоем со сфагновым покровом при участии трав. Содержание углерода в этом слое оставляет 50,1-53,4%, высокое значение содержания азота (1,6-2,6%), низкие соотношения C:N – 20:1-25:1 указывают на сохранение достаточной обеспеченности элементами минерального питания в карстовой воронке. Скорость накопления углерода (CAR) выявлена в пределах 46,8 и 68,3 г C/m² в год.

Зона 5 (115-105 см, 1,13-1,11 тыс. кал. л. н.) выделяется по кратковременному преобладанию пушицы в растительном покрове, что, возможно, связано с восстановлением болота после пожара. Следующая стадия (зона 6, 105-60 см, 1,11-0,48 тыс. кал. л. н.) – осоково-сфагновое болото

с редким древостоем. Для этой зоны характерны резкие колебания концентрации Corg от 38,2 до 52,3%, понижение концентрации азота до 1,0-1,6% и рост соотношения C:N до 30:1-40:1, свидетельствующий о переходе болота к мезотрофной стадии развития. Скорость аккумуляции углерода варьирует от 44,8 до 79,8 (среднее значение 60,3 г C/m² в год). В 7 зоне (60-50 см, 0,48-0,39 тыс. кал. л. н.) отмечено снижение доли сфагновых мхов при увеличении количества осок, пушицы и тростника, концентрация азота возрастает до 1,8-2,2% и снижается соотношения C:N до 22:1-27:1 (в интервале 56-50 см). Скорость аккумуляции углерода увеличивается с 70 до 158 г C/m² в год, достигая максимальных значений во всем разрезе. Вероятно, болото обогатилось минеральными веществами вследствие обводнения.

На следующем этапе (зона 8, 50-35 см, 0,39-0,3 тыс. кал. л. н.) восстановилась мезотрофная растительность, представленная осоками, сфагновыми мхами и древесными растениями. Содержание азота резко снижается с 2,2 до 1,2-1,4%, а соотношение C:N возрастает до 33:1-41:1. Скорость накопления углерода составляет от 96,5 до 142,4 г C/m². В 9 зоне (35-20 см, 0,3-0,2 тыс. кал. л. н.) резко увеличилось количество осок (до 80%), что говорит о возврате болота к эвтрофным условиям, возможно, из-за пожаров. На глубине 36-30 см отмечается максимальная зольность торфа и минимальные значения концентрации Corg 37,2-39,9%, выше по слою содержание углерода составляет 41,3-44,4%. Доля азота возрастает до 2,55-1,89%, соотношение C:N снижается до 16:1-23:1. Скорость аккумуляции углерода уменьшается с 128,6 до 44,9 г C/m²

в год. В верхней части торфяной залежи (зона 10, 20-0 см, 0,2 тыс. кал. л. н. – настоящее время) отмечены слаборазложившиеся остатки сфагновых мхов, торф отличается относительно низкими значениями Cорг и N (42.1-44.4% и 1.2-1.5% соответственно) и ростом C:N до 35:1. Скорость аккумуляции углерода составляет 75-100 г C/m² в год.

Болото Жегаловское-3 начало свое развитие около 11 тыс. кал. л. н. Его торфяная залежь сложена преимущественно низинными торфами, с прослойками угля и обугленного торфа, что указывает на периодические пожары и возможные перерывы в накоплении торфа. Потери при прокаливании превысили 90% на глубине 170 см и оставались на этом уровне, за исключением интервалов их сокращения до 75-80% на глубине 148 см (около 8,9 тыс. кал. л. н.) и в интервале 19-24 см (1,25-1 тыс. кал. л. н.). Оптическая плотность торфа варьирует в диапазоне от 0,2 до 0,9, а резкий наклон линии ее тренда указывает на высокую степень разложения, связанную с более сухими условиями и частыми пожарами. Выявлены значительные колебания удельной плотности сухой массы торфа от 0,1 до 0,15 г/см³ в период 11-7,5 тыс. кал. л. н., затем ее значения составляли около 0,14 г/см³ в период 7,5-3,2 тыс. кал. л. н., а после снижения числа пожаров около 3,2 тыс. кал. л. н. ее показатели достигли 0,2 г/см³.

В развитии болота Жегаловское-3 было выделено 5 этапов. На первом этапе (зона 1, 195-185 см, 11,1-10,5 тыс. кал. л. н.) болото начало формироваться как осоковое с примесью трав. Содержание C и N минимально и составляло: 0.5-9.12% и 0.02-0.6% соответственно, постепенно увеличиваясь вверх по залежи, соотношение C:N варьирует от 15:1 до 23:1. Скорость накопления углерода в этот период равна 0.02-2.3 г C/m² в год.

На втором этапе (зона 2, 185-120 см, 10,5-7,7 тыс. кал. л. н.) на болоте преобладала осоково-тростниковая растительность, в древостое появились редкие сосны. Содержание Cорг растёт, достигая значений 53-55% на глубинах 120-158 см. Содержание N составляет 0.97-2.3%, а соотношение C:N увеличивается до 1:15-1:28. В среднем скорость аккумуляции углерода в этой зоне составляет 16-18 г C/m² в год.

Зона 3 (120-72 см, 7,7-4 тыс. кал. л. н.) представлена осоковым торфом. В небольших количествах (до 5-10%) были отмечены остатки деревьев и кустарников. Содержание Cорг и N составляет 52.5-55.5% и 1.7-1.99% соответственно, а соотношение C:N увеличилось до 1:27-1:32. Скорость накопления углерода возрастает до

18-21.5 г C/m² в год, за исключением интервала 80-72 см, где ее значения снижаются до 8.3-10.7 г C/m² в год. Для этих же глубин характерно наибольшая частота встречаемости угольков в торфе.

На следующем этапе (зона 4, 72-15 см, 4-0,8 тыс. кал. л. н.) в локальной растительности болота увеличилось участие сосны. Травянистый ярус формировала пушица, доля осок не превышала 20%. Содержание Cорг составляет 52-56%, а начиная с глубины 46 см его значение постепенно снижается, достигая 43,7% на глубине 18-20 см. Концентрация азота колеблется в пределах 1.3-2.05%. Для данной зоны характерны наибольшие значения соотношения C:N – 1:40-1:43, а также максимальные значения скорости аккумуляции углерода (16-21 г C/m² в год на глубине 26-64 см).

На последнем этапе (зона 5, 15-0 см, 0,8 тыс. кал. л. н. – настоящее время) болото перешло в мезотрофную стадию, растительность болота формировали сфагновые мхи. Cорг составляет 44-45%, концентрация азота не превышает 2%, а соотношение C:N равно 1:27-1:33, снижаясь в верхних 4 см до 1:23. CAR сокращается до 5.5-6 г C/m² в год.

Результаты исследований показали, что запасы углерода в болоте Столбовое в 2 раза превышают этот показатель в болоте Жегаловское-3 (6.7 и 3.47 кг/m² соответственно). Накопление углерода не было равномерным: у болота Столбовое скорость аккумуляции углерода достигала 158.4 г C/m² в год, средняя была равна 68.9 г C/m² в год, что гораздо выше средних значений для болот бореальной области Северного полушария (Loisel et al., 2014), а у болота Жегаловское-3 скорость депонирования углерода составляла 15-20 г C/m² в год, что близко к средним значениям для болот лесной зоны. Согласно оценкам Инишевой с соавт. (2013), в среднем по России современная скорость аккумуляции углерода колеблется от 10.3 г C/m² в год в полигональных болотах до 51.7 г C/m² в год в низинных травяных болотах (Инишева и др., 2013). Эти отличия обусловлены в первую очередь разным положением болот, их генезисом и пожарным режимом. Болото Столбовое сформировалось во влажной карстовой воронке, где торфонакопление происходило непрерывно при отсутствии крупных пожаров. Болото Жегаловское-3 образовалось в эоловой котловине выдувания, в более сухих условиях, где постоянно происходили пожары, приводившие к выгоранию торфа и потерям углерода. Также его верхние горизонты летом чаще пересыхали, что способствовало более интенсивным процессам разложения и потерям углерода.

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 24-27-00096.

1. Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М.: Государственное энергетическое издательство, 1959. 228 с.
2. Инишева Л.И., Кобак К.И., Турчинович И.Е. Развитие процесса заболачивания и скорость аккумуляции углерода в болотных экосистемах России // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 60–68
3. Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics // *Mires and Peat*. 2010. Vol. 7. P. 1-10.
4. Loisel, J., Yu, Z., Beilman, D. W. et al. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation // *The Holocene*. 2014. Vol. 24. No. 9. P. 1028-1042.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

METHODOLOGICAL APPROACH TO ASSESSING CARBON STOCKS IN PEAT DEPOSITS OF WESTERN SIBERIA

Ю.И. Прейс, Е.А Головацкая., М.М. Кабанов
Yu.I. Preis. E.A. Golovatskaya, M.M. Kabanov

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)
E-mail: preisuyi@rambler.ru

Роль болотных экосистем в регулировании циклов углерода и климата достаточно велика, поскольку именно болотные экосистемы являются поглотителями углерода, накапливая его в виде торфяных залежей на длительный период. Необходимость количественной оценки запасов углерода в торфяных почвах, определяется также условиями Рамочной конвенции по климату, Киотского протокола и пост-киотских климатических соглашений (IPCC, 2021). В настоящее время имеются кадастры торфяных месторождений (т.м.) конкретных административных областей Западной Сибири. По данным кадастровых справочников и фондовых материалов геологической разведки т.м. возможны наиболее точные оценки запасов депонированного углерода. Для расчета запасов органического углерода ($Q_{\text{Сорг}}$) в т.м. необходимы данные по Q органического вещества ($Q_{\text{ов}}$) абсолютно сухого торфа (а.с.т.) и усредненному показателю содержания Сорг в ОВ в зависимости от типа торфяного месторождения. В кадастровых справочниках уже имеются достоверные, основанные на полевых и аналитических исследованиях, данные по площадям (S), средним глубинам ($h_{\text{ср}}$) торфяной залежи (т.з.), Q торфа 40% влажности ($Q_{40\%W}$) и усредненные показатели степени разложения ($R_{\text{ср}}$), зольности ($A_{\text{ср}}$) и естественной влажности ($W_{\text{ср}}$) не только в целом по т.м., но и по их участкам, а также отдельно по их т.з. разного типа в пределах балансовых (с A торфов не более 35 %) и забалансовых (с A более 35 %) запасов торфа. Поэтому прежде всего создается база данных, содержащая все имеющиеся в кадастровом справочнике данные.

Согласно требованиям (Методическое..., 1967), при проведении геологоразведочных работ для расчета $Q_{40\%W}$ торфа конкретного т.м. используются данные его площади (S), в границах промышленной глубины т.з., $h_{\text{ср}}$ т.з. и плотности (P) торфа из Таблицы Синадского (Таблицы..., 1969), в которых приведены данные выходов

воздушно-сухого торфа при условной 40 % влажности при разных сочетаниях показателей R и естественной влажности ($W_{\text{ест}}$), основанные на обширном массиве данных аналитических исследований проб торфа. Поэтому данные кадастровых справочников позволяют получить наиболее достоверные, детальные данные и по запасам $Q_{\text{Сорг}}$.

Далее, для расчета $Q_{\text{акт}}$ и $Q_{\text{ов}}$ т.м., его отдельных участков и т.з. разного типа, используются формулы 1 и 2.

$$1) Q_{\text{акт}} = Q_{40\%W} * 0.6, \text{ тыс. т.},$$

$$2) Q_{\text{ов}} = Q_{\text{акт}} - Q_{\text{акт}} * A_{\text{ср}} / 100, \text{ тыс.},$$

где 0,6 – доля а.с. вещества торфа, $A_{\text{ср}}$ – средняя зольность, в процентах.

На современный момент отсутствуют репрезентативные данные по $S_{\text{орг}}$ в торфах Западной Сибири, необходимые для расчетов их усредненных показателей для болот разного типа. Поэтому целесообразно использовать данные из (Лиштван, Король, 1975) по Европейской части СССР, которые необходимо преобразовать в открытую базу данных по Сорг для возможности корректировки ее по мере поступления новых данных по западно-сибирским торфам. Для расчета усредненных показателей необходимы данные о процентном соотношении видов торфа в т.з. разного типа. Для этого по кадастровому справочнику проводится выбор типичных т.м. с учетом их типовой принадлежности, геоморфологического положения, размера и средней глубины т.з. Затем по фондовым материалам геологической разведки этих т.м. создается общая база данных свойств торфов, в которой для каждого пункта отбора образцов указывается тип т.з. и вид торфа для каждого ее 25-ти см слоя. В пределах этой базы данных вся информация по пунктам отбора проб торфа делится на 4 блока по типам т.з. Затем по каждому блоку проводится сортировка по типам и видам торфа и рассчитывается процент участия каждого вида торфа в пределах каждого блока типов т.з. по формуле 3:

$$3) F_k = \frac{\bar{N}_k}{\sum_{i=1}^n N_i}, k = 1..n$$

где N_k, N_i – количество проб определенного вида торфа в блоке конкретного типа т.з., n – общее количество видов торфа

Среднее содержание $C_{орг}$ для каждого типа т.м. или его т.з. рассчитывается как сумма произведений содержания $C_{орг}$ каждого вида торфа, по созданной базе данных $C_{орг}$, на процент участия его в блоке конкретного типа т.з. по формуле 4:

$$4) \underline{C}_{орг} = \sum_{i=1}^n C_{орг}^{(i)} * F_i$$

где $C_{орг}^{(i)}$ – содержание $C_{орг}$ для каждого вида торфа по базе данных $C_{орг}$, %, F_i – доля каждого вида торфа в блоке конкретного типа т.з., %

В связи с тем, что торфяные месторождения района исследования находятся на разных стадиях разведки, детальность характеристик запасов их торфов в кадастровом справочнике значительно различается. Для разведанных торфяных месторождений с категориями изученности запасов торфа: А, В, С1 и С2 пересчет запасов а.с.т. и ОВ, для получения наиболее корректных данных, проводится следующим образом:

– при наличии несколько участков разных стадий разведки – по каждому участку при условии совпадения сумм их площадей и запасов с суммарными показателями по торфяному месторождению;

– при наличии торфяной залежи только одного типа – по категориям торфяного сырья балансовых запасов: малой степени разложения (R); средней R с А до 23 %; средней и высокой R с А от 23 до 35% и забалансовым, с А более 35%.

Для прогнозно-оцененных торфяных месторождений или их участков (с категориями изученности прогнозных ресурсов (запасов) торфа Р1 – Р3, как правило, даже при наличии нескольких типов торфяной залежи, приведены лишь ресурсы торфа и $A_{ср}$, общие для всего месторождения. В этом случае ресурсы каждого типа залежи рассчитываются пропорционально запасам аналогичных типов т.з. т.м. – аналога, имеющегося в кадастре, а при его отсутствии в кадастре – вновь, в процессе выполнения работы, принятого на основании сходства геоморфологического положения, площади и средней глубины т.з. При отсутствии необходимых данных для выбора т.м. – аналога запасы ресурсов для разных типов т.з. рассчитываются пропорционально количеству типов т.з. Аналогично принимаются и показатели $A_{ср}$ для каждого типа их залежи. Так при наличии нескольких типов т.з. для восполнения отсутствующих у них показателей $A_{ср}$ проводится пересчет $A_{ср}$ для каждого типа с учетом доли запасов торфа этого же типа т.з. у т.м. – аналога. Иногда от-

сутствуют и некоторые другие необходимые для расчетов содержания $C_{орг}$ данные. Восполнить эти данные возможно следующим образом. При отсутствии показателя $A_{ср}$ забалансовых запасов прогнозно-разведанного участка т.м. принимается показатель $A_{ср}$ забалансовых запасов других разведанных участков этого же т.м. или его аналога, имеющегося или вновь присвоенного в процессе выполнения работы. При отсутствии показателя $A_{ср}$ категории торфяного сырья средней и высокой R с А от 23 до 35% принимается средний показатель для этой категории – 29,5 %, а для категории с А более 35% – 42,5 %.

Таким образом, в связи с недостаточным количеством аналитических данных по содержанию $C_{орг}$ в торфах Западной Сибири, для получения статистически достоверных усредненных его показателей актуально создание единой открытой базы данных $C_{орг}$ в торфах этого региона. Для этого необходимо проведение дополнительных аналитических исследований содержания $C_{орг}$ в разных видах торфов единым методом, предпочтительно – методом сухого сжигания на автоматических элементных анализаторах, по репрезентативной выборке образцов торфа и с обязательным параллельным определением зольности и степени разложения. В высокозольных низинных торфах дополнительно необходимо определение содержания неорганического углерода.

Предложенная методика расчета запасов углерода в торфяных месторождениях по данным кадастровых справочников и фондовых материалов геологической разведки типичных торфяных месторождений Западной Сибири включает следующие этапы:

аналитические исследования содержания $C_{орг}$ в типичных видах торфов по репрезентативной выборке образцов для расчета его средних показателей;

расчет усредненных показателей содержания $C_{орг}$ для разных типов торфяных месторождений на основе содержащихся в фондовых материалах геологической разведки типичных для района исследования торфяным месторождениям данных по типу и видовой принадлежности образцов торфа;

пересчет запасов торфа 40% W для каждого месторождения и их типовых участков из кадастрового справочника на ОВ а.с. торфа;

пересчет запасов $C_{орг}$ по запасам ОВ а.с. торфа для каждого месторождения и их типовых участков из кадастрового справочника;

определение суммарных запасов углерода по всем торфяным месторождениям.

Методика требует использования интегрированной базы данных, объединяющей данные по содержанию углерода в видах торфа, фондо-

вые данные геологической разведки торфяных месторождений района исследования, данные кадастровых справочников по характеристикам торфяных месторождений макрорегиона. Привлекая эти категории данных, описанная методика позволяет построить уточненные оценки

содержания углерода. Дальнейшая разработка автоматизированной системы на основе реальных данных и вышеописанной методики позволит получать уточненные и конкретизированные оценки запасов углерода в автоматическом режиме за минимальное время.

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).

1. IPCC: Index. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf (дата обращения 16.05.2023).
2. Сорокин В. Н., Задунайский Я. Н., Стеклов И.А. Методическое руководство по разведке торфяных месторождений. М М.: Геолторфразведка, 1976. 572 с.
3. Таблицы для определения выхода воздушно-сухого торфа в тоннах, при 40 % условной влажности из 1000 куб. м торфа. Приложение к «Методическому руководству по камеральной обработке материалов разведки торфяных месторождений» / Составитель: А.А. Синадский. М: Гипроторфразведка, 1969. 12 с.
4. Лиштван И.И., Король Н.Т., 1975 Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 320 с.

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОГО ОБВОДНЕНИЯ НА ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В РАСТИТЕЛЬНОСТИ БОЛОТНОГО КОМПЛЕКСА «БЕРКАЗАН-КАМЫШ»

INFLUENCE OF SECONDARY WATERING ON CARBON STOCKS IN VEGETATION OF THE BOG COMPLEX OF BERKAZAN-KAMYSH

*П.С. Широких, Н.И. Федоров, И.Г. Бикбаев, С.Н. Жигунова, Э.З. Баишева,
И.Р. Туктамышев*
*P.S. Shirokikh, N.I. Fedorov, I.G. Bikbaev, S.N. Zhigunova, E.Z. Baisheva,
I.R. Tuktamyshev*

Уфимский государственный нефтяной технический университет (г. Уфа, Россия)
Уфимский институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН
(г. Уфа, Россия)
E-mail: shirpa@mail.ru

Водно-болотные угодья играют гораздо большую роль в глобальном углеродном цикле, чем можно предположить по их площади. Производство растительной биомассы и ограниченное разложение из-за постоянного насыщения почвы водой делают их важными атмосферными поглотителями углерода. Однако они легко могут превратиться в источники эмиссии углерода из-за засух, осушения и торфяных пожаров (Frolking et al., 2011; Сирин, 2022).

Сохранение структуры и функций торфяников зависит от поддержания положительного углеродного баланса: поступление атмосферного углерода в экосистему должно превышать количество его экспорта (Laiho, 2006; MacDonald et al., 2006). На скорость углеродного обмена в болотных экосистемах оказывает влияние множество экологических факторов, важнейшими из которых считаются температура и уровень болотных вод. Одни и те же болотные экосистемы в разные годы могут служить как источником, так и стоком углерода (Головацкая, Дюкарев, 2012; Сирин, 2022).

Торфяник Берказан-Камыш площадью более 1000 га, расположенный в лесостепной зоне Республики Башкортостан (Давлекановский район, Природный парк «Аслы-Куль», координаты 54°15'30" с.ш., 54°40'04" в.д) является одним из самых крупных болотных комплексов лесостепной зоны республики. Во второй половине XX века болото было осушено и частично разработано. В 2017 г. в рамках одного из проектов Программы развития ООН торфяник был вторично обводнен. С этого времени началось медленное восстановление болотной растительности и активизировались процессы торфообразования.

На данном объекте, как до обводнения, так и после него специалистами УГНТУ, УИБ УФИЦ

РАН, ИЛАН РАН, а впоследствии и специалистами ЮГУ велось наблюдения по изменению растительного покрова, а также проводились измерения потоков парниковых газов. По результатам исследований удалось наглядно показать разницу в эмиссии и депонировании атмосферного углерода на обводненных и осушенных участках болота (Природные..., 2018; Ильясов и др., 2017, 2018; Ильясов, 2019).

В 2022-2023 годах с использованием БПЛА, мультиспектрального и лидарного сканирования и ретроспективных космических снимков было проведено повторное картирование основных типов растительности болота «Берказан-Камыш», а также анализ изменения их площадей, запасов фитомассы и углерода.

Обследование болотного комплекса в 2022-2023 гг. показало, что за 7 лет вторичное обводнение привело к перераспределению площадей различных типов растительных сообществ, что связано с повышением уровня почвенно-грунтовых вод. До обводнения преобладающим типом являлась солончаковая лугово-разнотравная растительность (солончаковатые овсянницево-разнотравные, влажно-луговые, слабо солончаковатые вейниково-разнотравные луга), занимавшая 79% площади болота. Непосредственно типичная болотная растительность (тростниково-осоковые, тростниковые, клубнекамышево-тростниково-разнотравные и рогозниковые сообщества) составляла всего 21% от общей площади.

После вторичного обводнения произошло увеличение площадей типичной болотной растительности почти в 3 раза (с 218 га до 608 га) и одновременно сократились площади солончаковой лугово-разнотравной растительности в 2 раза (с 808 га до 383 га). Увеличилось разнообразие

растительного покрова, в котором стали занимать значительные площади осоковые и рогозниковые сообщества, а также группировки древесно-кустарниковой растительности, которые до обводнения занимали небольшие площади и входили в состав комплексов с преобладающими на тот момент типами растительности.

Изменение площадей растительных сообществ также привело к увеличению общих запасов надземной фитомассы в 8 раз (с 795 т до 6301 т) и запасов углерода в 6 раз (с 340 тС до 2343 тС). Вместе с тем отмечается снижение суммарных запасов надземной фитомассы солончаковой луговой растительности в 2 раза (с 2493 до 1224 т) и снижение запасов углерода в 1,3 раза (с 1019 тС до 796 тС). В целом, суммарный запас надземной фитомассы и углерода на обводненном болоте увеличился в 2 раза (с 3288 т до 7524 т и с 1359 тС до 3189 тС соответственно).

На основе опубликованных данных нетто-экосистемного обмена болота «Берказан-Камыш» (Ильясов и др., 2017; Ильясов, 2019) и собственных исследований получены предварительные результаты о динамике депонирования углерода. Основной вклад в эмиссию углерода вносят солончаковые овсяницево-разнотравные и влажно-луговые слабо солончаковые вейниково-разнотравные луговые сообщества, автотрофные компоненты которых не способны к быстрой ассимиляции углерода, а почвы в силу понижения

уровня грунтовых вод – к его сохранению. Данные сообщества, распространенные на площади в 346 га, суммарно теряют до 494 тС/год. Тростниковые, тростниково-осоковые, клубнекамышово-тростниково-разнотравные и рогозниковые сообщества являются источником стока углерода и поглощают суммарно 228 тС/год с площади в 607 га. Таким образом через 7 лет после вторичного обводнения суммарное изменение эмиссии углекислого газа на площади болота в 1026 га сократилось с 1129±420 тС/год до 308±180 тС/год и следовательно все еще является источником эмиссии углерода. Тем не менее вторичное обводнение осушенного торфяника привело к сокращению выбросов CO₂ накопительным итогом к 2024 г. до 21,1±7 тыс. т CO₂-экв. и по прогнозу к 2060 г. достигнет 136±35 тыс. т CO₂-экв.

В республике Башкортостан только в Предуралье было выявлено более 350 антропогенно измененных торфяников с общей площадью свыше 47 тыс. га (Баишева и др., 2022). Большинство этих болот было осушено и не используется, а система их осушительных каналов полноценно не функционирует. Таким образом, вторичное обводнение осушенных болот может внести существенный вклад в снижение эмиссии парниковых газов, стимулировать восстановление экосистемных функций и биоразнообразия, а также повысить экологическую устойчивость и пожарную безопасность ландшафтов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Оценка баланса парниковых газов на участках Евразийского карбонового полигона с целью разработки технологий увеличения депонирования углерода экосистемами Республики Башкортостан на 2024-2026 годы» (Номер для публикаций: FEUR-2024-0007).

1. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. 2012. Влияние факторов среды на эмиссию CO₂ с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение. № 6. С. 658.
2. Ильясов Д.В. 2019. Современное состояние осушенного болотного массива в условиях лесостепи: на примере урочища Берказан-Камыш, Республика Башкортостан: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Ильясов Данил Викторович. Москва. 24 с.
3. Ильясов Д. В., Сирин А. А., Суворов Г. Г., Мартыненко В. Б. 2017. Летние потоки диоксида углерода и метана на осушенном торфянике в условиях лесостепи Республики Башкортостан // Агрехимия. № 1. С. 50–62.
4. Ильясов Д.В., Сирин А.А., Суворов Г.Г., Метелева М.М., Маслов А.А., Мулдашев А.А., Широких П.С., Бикбаев И.Г., Мартыненко В.Б. 2018. Почвы и растительность антропогенноизмененного торфяника в степной зоне (на примере массива Берказан-Камыш, Башкирия) // Агрехимия. № 12. С. 46–59.
5. Природные условия и биота Природного парка «Аслы-Куль». 2018. / кол. авт.; под ред. Б.М. Миркина, В.Б. Мартыненко. Уфа: Башк. энцикл., 456 с.
6. Сирин А. А. 2022. Болота и антропогенно-измененных торфяники: углерод, парниковые газы, изменение климата // Успехи современной биологии. Т. 142. №. 6. С. 560-577.
7. Frolking S., Talbot J., Jones M. C., Treat C. C., Kauffman J. B., Tuittila E. S., Roulet N. 2011. Peatlands in the Earth's 21st century climate system // Environ. Rev. V. 19. P. 371-396.
8. Laiho R. 2006. Decomposition in peatlands: Reconciling seemingly contrasting results on the impacts of lowered water levels // Soil Biol. Biochem. V. 38, № 8. P. 2011–2024.
9. MacDonald G. M., Beilman D. W., Kremenetski K. V., Sheng Y., Smith L. C., Velichko A. A. 2006. Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH₄ and CO₂ variations // Science. V. 314, № 5797. P. 285–288.

Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed mire ecosystems. Biogeochemistry of peats and mire waters

Hydrology and ecology of mires. Biogeochemistry of peats and mire waters

Биогеохимические циклы естественных и антропогенно-нарушенных болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод.

Гидрология и экология болот. Биогеохимия торфов и болотных вод

MARINE-LAND IODINE TRANSPORT INDICATED FROM 14 KYR IODINE RECORD IN PEAT CORE FROM CENTRAL CHINA

Yukun Fan^{1,2}, Hong Yan^{1,2,3}, Haiyan Zhao³, Xiaolin Hou^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology,

Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences (Xi'an, China)

² Shaanxi Key Laboratory of AMS Technology and Application (Xi'an AMS Center, Xi'an, China)

³ Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research (Xi'an 710061, China)

E-mail: fanyk@ieecas.cn

Iodine, a biophilic element, has been playing an important role in evolution of the climate and atmospheric environment, as well as the public health. Ice core records indicate that ocean, the reservoir of iodine on the Earth's surface, is the main source of atmospheric iodine over the ocean (Corella et al., 2022, 2019), but our understanding of the terrestrial iodine sources is still limited. Although the release from plants and soils is considered the main contributor to terrestrial atmospheric iodine (Sive et al., 2007), our investigation of iodine isotopes in the entisols suggests that the transport of marine iodine to inland areas on the Holocene scale is estimated to be up to 34% (Fan et al., 2024). Besides natural factors, the impact of human activities cannot be ignored. Analysis of fine particulate matter collected from four Chinese metropolises shows that the consumption of fossil fuels such as coal and oil contributes more than 85% to winter inland atmospheric iodine (Fan et al., 2023). Then the questions arise that what are the respective contributions and impacts of human and natural factors on iodine in inland environments, and what the inland atmospheric iodine trend will evolve in the context of global warming. These questions continue to linger, making it imperative to delve into historical records in search of potential answers. Peatlands are one of the main sinks of organic carbon, and iodine is also highly concentrated in peat due to its high affinity with organic matter. Here, we report the iodine content record in peat cores from the Dajiu Basin in central China over the past 14 kyr. Through

comparative analysis with other climate indicators, the following findings were obtained: (1) The pattern of iodine content is similar to that of the total organic carbon content (TOC, Zhang et al., 2016) in the borehole, verifying that the enrichment of iodine in peat is mainly controlled by organic matter content. (2) The iodine content per mass unit of organic carbon (ITOC) was higher during the B/A and 11-9 kyr, lower during the Younger Dryas, and decreased slowly after 9 kyr. (3) This record has a similar pattern to the $\delta^{18}\text{O}$ -derived surface seawater temperature (SST) in the eastern (Marzin et al., 2013; Rashid et al., 2007) and central (Liu et al., 2021) Bay of Bengal, but no correlation with the SST of the Western Pacific Warm Pool (Zhang et al., 2021). (4) Our peat ITOC record also shows a certain correlation with the total planktonic foraminifera in the eastern Bay of Bengal (Sijinkumar et al., 2011) and the *Brassicasterol* content in the southwestern of the bay (Punyu et al., 2014). These similarities indicate that the iodine emission from the Indian Ocean, which is controlled by SST, can be transported to inland central China through the Indian monsoon, and primary productivity can jointly affect this emission. These findings reveal a strong influence of the ocean on iodine in inland environments, which is much greater than expected. This updates our understanding of iodine sources in terrestrial, especially inland, environments, as well as the patterns and intensities of terrestrial-marine iodine cycling, and will help us predict the future development trends of inland atmospheric iodine content.

1. Corella, J.P., Maffezzoli, N., Cuevas, C.A., Vallelonga, P., Spolaor, A., Cozzi, G., Müller, J., Vinther, B., Barbante, C., Kjaer, H.A., Edwards, R., Saiz-Lopez, A., 2019. Holocene atmospheric iodine evolution over the North Atlantic. *Climate of the Past Discussions* 1–15. <https://doi.org/10.5194/cp-2019-71>
2. Corella, J.P., Maffezzoli, N., Spolaor, A., Vallelonga, P., Cuevas, C.A., Scoto, F., Müller, J., Vinther, B., Kjaer, H.A., Cozzi, G., Edwards, R., Barbante, C., Saiz-Lopez, A., 2022. Climate changes modulated the history of Arctic iodine during the Last Glacial Cycle. *Nat Commun* 13, 88. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27642-5>
3. Fan, Y., Cheng, P., Negri, A., Lan, J., Liu, X., Zhou, W., Liu, Q., Hou, X., 2024. Climate Control of Iodine Isotopic Composition Evidenced by Argentine Entisols Records. *Geophys Res Lett* 51. <https://doi.org/10.1029/2023GL107811>
4. Fan, Y., Xu, H., Hou, X., Zhou, W., Zhang, L., Chen, N., 2023. Isotopic Evidence Unveils Fossil Fuels Contribution to Atmospheric Iodine. *Environ Sci Technol*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05075>

5. Liu, S., Ye, W., Chen, M.-T., Pan, H.-J., Cao, P., Zhang, H., Khokiattiwong, S., Kornkanitnan, N., Shi, X., 2021. Millennial-scale variability of Indian summer monsoon during the last 42 kyr: Evidence based on foraminiferal Mg/Ca and oxygen isotope records from the central Bay of Bengal. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 562, 110112. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.110112>
6. Marzin, C., Kallel, N., Kageyama, M., Duplessy, J.-C., Braconnot, P., 2013. Glacial fluctuations of the Indian monsoon and their relationship with North Atlantic climate: new data and modelling experiments. *Climate of the Past* 9, 2135–2151. <https://doi.org/10.5194/cp-9-2135-2013>
7. Punyu, V.R., Banakar, V.K., Garg, A., 2014. Equatorial Indian Ocean productivity during the last 33 kyr and possible linkage to Westerly Jet variability. *Mar Geol* 348, 44–51. <https://doi.org/10.1016/J.MARGE.2013.11.010>
8. Rashid, H., Flower, B.P., Poore, R.Z., Quinn, T.M., 2007. A ~25 ka Indian Ocean monsoon variability record from the Andaman Sea. *Quat Sci Rev* 26, 2586–2597. <https://doi.org/10.1016/J.QUASCIREV.2007.07.002>
9. Sijinkumar, A. V., Nath, B.N., Possnert, G., Aldahan, A., 2011. Pulleniatina Minimum Events in the Andaman Sea (NE Indian Ocean): Implications for winter monsoon and thermocline changes. *Mar Micropaleontol* 81, 88–94. <https://doi.org/10.1016/J.MARMICRO.2011.09.001>
10. Sive, B.C., Varner, R.K., Mao, H., Blake, D.R., Wingenter, O.W., Talbot, R., 2007. A large terrestrial source of methyl iodide. *Geophys Res Lett* 34, L17808. <https://doi.org/10.1029/2007GL030528>
11. Zhang, W., Yan, H., Cheng, P., Lu, F., Li, M., Dodson, J., Zhou, W., An, Z., 2016. Peatland development and climate changes in the Dajiuhu basin, central China, over the last 14,100 years. *Quaternary International* 425, 273–281. <https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2016.06.039>
12. Zhang, Y., Zheng, X., Kong, D., Yan, H., Liu, Z., 2021. Enhanced North Pacific subtropical gyre circulation during the late Holocene. *Nat Commun* 12, 5957. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26218-7>

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ БОЛОТ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

TEMPERATURE REGIME OF THE BOGS OF THE TUNKA DEPRESSION DURING THE MODERN CLIMATE CHANGES

Н.Н. Воропай^{1,2}

N. Voropaï^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

² Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (г. Иркутск, Россия)

E-mail: voropay_nn@mail.ru

В условиях современных климатических изменений исследования температурного режима сезоннооттаивающих и сезоннопромерзающих почв становятся более актуальными, чем в предыдущие десятилетия. Особый интерес вызывают территории находящиеся на границе распространения многолетней мерзлоты. К таким территориям относятся некоторые районы Иркутской области и Республики Бурятия. Сотрудниками ИГ СО РАН в 2011 г. начаты наблюдения за температурным режимом почв в Тункинской котловине (юго-западное Прибайкалье). Несколько модельных площадок с сезонно-протаивающими почвами расположено на территории Койморского озерно-болотного комплекса. Наблюдения проводятся на естественных и антропогенно нарушенных участках, на которые в разное время оказывалось воздействие (нарушение естествен-

ного покрова, сведения лесных массивов, частичное или полное уничтожение лесных массивов пожарами, создание осушительных каналов). На естественных (фоновых) участках глубина проникновения положительных температур ограничивается 80-120 см. На нарушенных – верхняя граница многолетней мерзлоты опустилась глубже 3 м. Наличие многолетне-мерзлых почв подтверждается и результатами георадарной съемки, совпадающими с измерениями профиля температуры почвы на площадках мониторинга (Галанина, 2021). В отличие от температурных рядов на площадках с минеральной почвой, где фиксируются положительные тенденции изменения за последнее десятилетие, температура торфяной почвы даже в сезонно-оттаивающем слое понижается, хотя тренды в большинстве случаев статистически не значимы.

Галанина О. В., Федорова И. В., Воропай Н. Н., М. П. Кашкевич, Паршина Т. В. Койморские водно-болотные угодья (Прибайкалье) // Материалы конференции «XI Галкинские Чтения» (Санкт-Петербург, 21 апреля 2021 г.). СПб.: БИН РАН, 2021. – С. 63-66.

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА РАСТЕНИЙ-ТОРФООБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РАЗЛОЖЕНИЯ

BIOGEOCHEMICAL TRANSFORMATION OF ORGANIC MATTER OF PEAT-FORMING PLANTS DURING THE PROCESS OF DECOMPOSITION

Е.А. Головацкая, Л.Г. Никонова
E.A. Golovatskaya, L.G. Nikonova

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, (г. Томск, Россия)
E-mail: golovatskayaea@gmail.com

Болотные экосистемы играют важнейшую биосферную роль за счет способности постоянно накапливать углерод в виде торфяных залежей. Постоянное накопление органического вещества торфа происходит в результате превышения скорости его образования над деструкцией. Биогеохимические циклы олиготрофных болот, в отличие от минеральных почв, в силу особенностей минерального питания, слабо связаны с минеральными горизонтами, грунтовыми водами и окружающими ландшафтами, так как основная часть микро- и макроэлементов поступает в результате атмосферного выпадения (Веретенникова, Головацкая, 2012; Татаринцева и др., 2022). Растительный опад служит основным источником энергии и питательных веществ в экосистемах, поэтому разложение опада является одним из основных потоков углерода (С) в атмосферу, а также приводит к изменению концентрации химических элементов (источником трансформации, модификации, преобразования) в экосистемах (Berg, 2014). Следовательно, разложение опада является важным процессом в функционировании естественной экосистемы и способствует высвобождению или накоплению химических элементов (Shcherbov, Lazareva, 2010; Jonczak, 2013; Berg, 2014).

Цель работы заключалась в исследовании особенностей процесса биогеохимической трансформации органического вещества растений-торфообразователей в процессе разложения в торфяной почве сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза.

Исследования проводились на олиготрофном болоте Бакчарское (Бакчарский р-н Томской обл.) в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе. В 2008 году был заложен опыт по определению скорости разложения растений-торфообразователей. Для определения ин-

тенсивности деструкции растительных остатков применялся метод закладки растительности в торф (Козловская и др. 1978, Головацкая, Никонова, 2017). Для этого в августе-сентябре 2008 г. на болоте были собраны растения, характерные для сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза *Sph. fuscum*, *Andromeda polifolia*, *Ledum palustre*, *Chamaedaphne calyculata*, *Pinus sylvestris*, *Rubus chamaemorus*. Растительный материал был высушен в лабораторных условиях и развешен в нейлоновые мешочки (масса навески 3-6 г). Подготовленные образцы закладывали в торфяную залежь на глубину 10 см от поверхности в конце вегетационного периода (сентябрь 2008 г). Образцы извлекались через 12, 24, 36, 48 месяцев. В исходных образцах и после эксперимента разложения определяли убыль массы растительного вещества весовым методом, а также изменение зольности, содержания углерода и азота по общепринятым методикам (Агрохимические методы исследования почв, 1975; Пономарева, 1975). Определение элементного состава золы растительных остатков проводилось с использованием электронного микроскопа HITACHI-S-3400N с приставкой для микроанализа.

В результате проведенных исследований выявлено, что наиболее интенсивные процессы разложения протекают на начальном этапе разложения, затем скорость разложения снижается. Наиболее устойчив к разложению *Sph. fuscum*, наименее устойчив *Rubus chamaemorus* (рис.1). Кустарнички характеризуются средней скоростью разложения. Выявлена зависимость скорости разложения растительных остатков от исходного содержания азота, зольных элементов и отношения С/Н, которая подтверждает влияние химического состава растений-торфообразователей на скорость разложения, выявленную ранее другими исследователями.

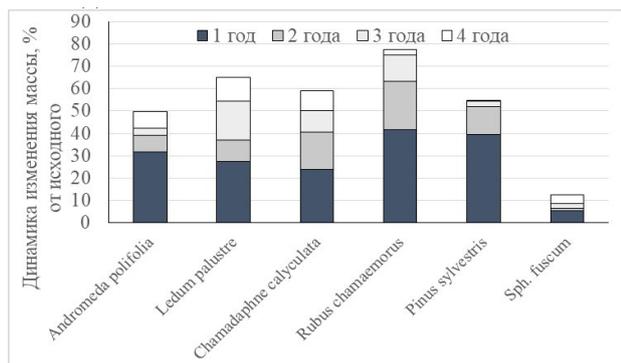


Рисунок 1. Потери массы при разложении растений-торфообразователей

Динамика выноса углерода из растительных остатков растений-торфообразователей повторяет динамику потери массы органического вещества при деструкции. Вынос углерода при разложении растений-торфообразователей в течение года в зависимости от вида растения составляет от 3% (*Sph. fuscum*) до 77% (*Rubus chamaemorus*). В процессе разложения растительных остатков в течение первого года, как правило, наблюдается иммобилизация азота во видах исследуемых растений, за исключением *Pinus sylvestris*. К концу эксперимента потери азо-

та составляют от 13% (*Pinus sylvestris*) до 55% (*Rubus chamaemorus*) от исходного количества. В процессе минерализации растительных остатков изменяется и их зольность. Во всех образцах к концу эксперимента наблюдается снижение зольности в 1,2-1,9 раза по сравнению с исходными значениями, за исключением *Sph. fuscum*, для которого получено незначительное увеличение зольности.

В состав золы растений входит ряд элементов - K, Ca, P, Mg, Al, Si, S, Fe, при этом наибольшую роль в составе золы играют K и Ca. В составе золы *Sph. fuscum* содержится довольно большое количество Si и Fe (рис.2). В процессе разложения к концу четвертого года наблюдается резкое снижение содержания калия (в 1,6-7,9 раз) и кальция (в 2,2-7,1 раз) во всех образцах, за исключением *Sph. fuscum*, в образцах которого наблюдается снижение содержания калия и увеличение кальция в 1,4 раза относительно исходного содержания. Также для всех образцов характерно накопление железа, алюминия и кремния. Содержание фосфора увеличивается во всех образцах за исключением *Sph. fuscum*. Полученные нами данные в целом согласуются с приведенными в литературе (Базилевич, Титлянова 2008, Паршина, 2009).

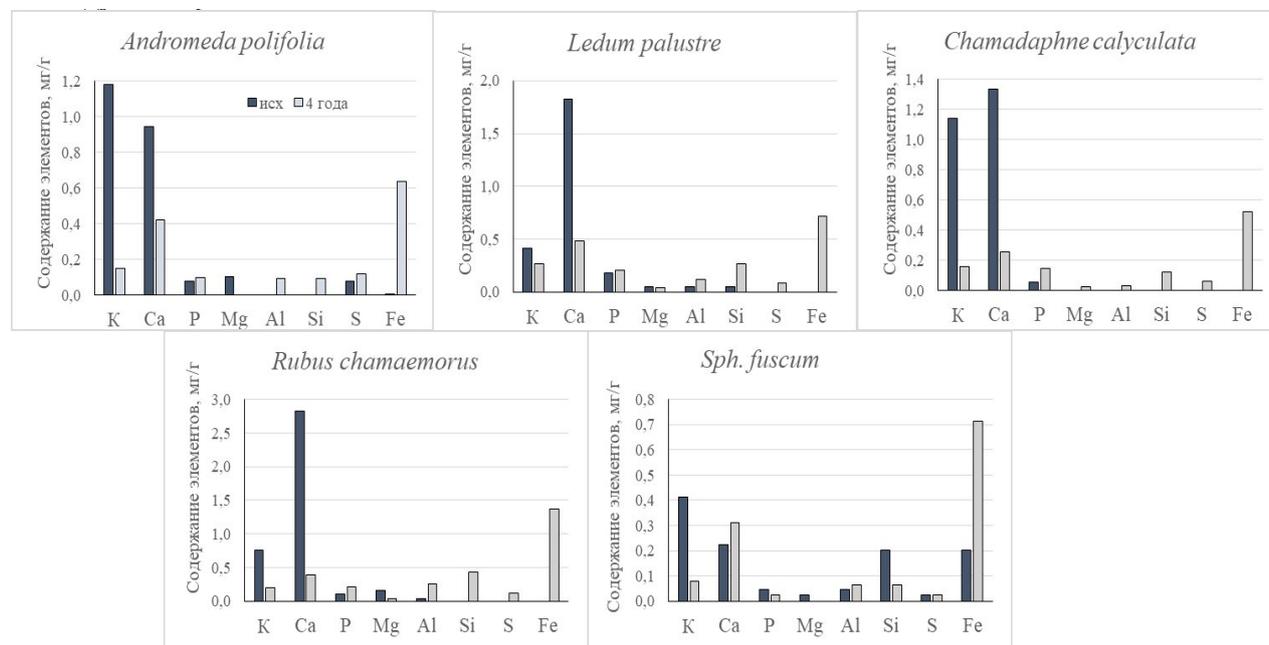


Рисунок 2. Изменение зольного состава в процессе трансформации растений-торфообразователей

Таким образом, в процессе разложения растительных остатков растений-торфообразователей происходит не только убыль массы, но и изменение химического состава: к концу эксперимента наблюдается вынос углерода во всех растительных остатках, динамика выноса

углерода соответствует потерям массы органического вещества; во всех образцах (за исключением *Sph. fuscum*) наблюдается вынос азота. Выявлено, что зольность растительных остатков снижается в 1,2-1,9 раз, за исключением *Sph. fuscum* для которого наблюдается

небольшое увеличение зольности. В процессе разложения растительных остатков происходит изменение элементного состава золы: снижение содержания калия и кальция, увеличение содержания Fe, Al, Si, P во всех исследуемых образцах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (НИОКТР 121031300154-1).

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука. 1975. 656 с.
2. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биологический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах, Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. 381 с.
3. Веретенникова Е.Э., Головацкая Е.А. Распределение свинца и ртути в торфяных залежах Западной Сибири (болота Васюганья) // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 2. С. 181–187.
4. Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // Почвоведение. 2017. № 5. С. 606–613. DOI:10.7868/80032180X17030030
5. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука. 1978. 176 с.
6. Паршина Е.К. Деструкция растительного вещества в болотных экосистемах таежной и лесотундровой зон Западной Сибири: автореф. дис. канд. биол. наук. Томск, 2009, 23 с.
7. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). Л.: Наука. 1975. 105 с.
8. Татаринцева В.Г., Котова Е.И., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Селянина С.Б., Дайбова Е.Б. Металлы и As в торфе верховых болот Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 60–65. DOI: 10.17513/use.37842.
9. Berg B. Decomposition patterns for foliar litter: A theory for influencing factors // Soil Biology and Biochemistry. 2014. 78. P. 222–232. DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.08.005.
10. Jonczak J. Effect of peat samples drying on measured content of carbon and nitrogen fractions // Soil Science Annual. 2013. 64. 4. P. 130.
11. Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Migration factors of radionuclides and heavy metals during forest fires in Siberia // Advances in Environmental Research. 2010. 4. P. 99-119.

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ТОРФЯНИКОВ ОБСКОГО НИЗИННОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

ORGANIC MATTER IN THE PEATS OF THE OB LOW-MOOR PEAT BOG (WESTERN SIBERIA)

*A.A. Гринько¹, О.Г. Савичев², Т.В. Чешкова^{3,4}, Е.В. Гершелис¹, Ю.А. Моисеева¹
A.A. Grinko¹, O.G. Savichev², T.V. Cheshkova^{3,4}, E.I.V. Gershelis¹, Y.A. Moiseeva¹*

¹ Научно-технологический университет «Сириус» (Краснодарский край, Россия)

² Томский политехнический университет (г. Томск, Россия)

³ Институт химии нефти СО РАН (г. Томск, Россия)

⁴ Сибирский государственный медицинский университет (г. Томск, Россия)

Значительная часть территории Западной Сибири покрыта торфяными болотами, площадь и глубина которых в настоящее время увеличиваются, что существенно влияет на все аспекты функционирования природно-территориальных систем – замещение лесных фитоценозов болотами, деформация инженерных систем и сооружений, значительное ухудшение качества речных, озерных и подземных вод, в том числе используемых для хозяйственно-питьевых целей и т.д. (Лисс и др., 2001; Савичев, Ян Хэнь, 2021). В то же время огромные запасы торфа остаются неразведанными и практически не используются (Оленин и др., 1988; Инишева и др., 1995). Элементный и групповой состав торфа является интегральной характеристикой как исходного состава остатков торфообразующих растений, так и биогеохимических и гидрогеохимических условий образования и развития торфа (Savichev et al., 2020; Бернатонис и др., 2002). Групповой состав торфа важен как при изучении процессов торфообразования, так и при разработке методов его использования и оценки геоэкологических функций, что определяет общую актуальность исследований органического вещества (ОВ) тор-

фяников, особенно с учетом использования современных аналитических методов.

Цель настоящего исследования – выявить закономерности пространственного распределения органических веществ в торфяниках Обского низинного болота. Географически болото расположено в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины на границе с Алтае-Саянскими горами, а административно – в южной части Томской области Российской Федерации. Обское болото расположено в левобережной части долины реки Обь и характеризуется как низинное эвтрофное болото длиной чуть более 100 км, шириной 1,5-7,0 км, со средней глубиной 3,2 м и максимальной глубиной 6,0-6,5 м; торфы – осоковый, осоково-древесный, древесный, гипновый, осоково-гипновый, тростниковый низинного типа со средней степенью разложения 34 % и зольностью 28-29 % (Savichev et al., 2020). Основным объектом исследования является участок низинного Обского болота вблизи села Нащеково без признаков явного антропогенного загрязнения (рис. 1). На этом участке отбирались пробы торфа в точках Н1-Н4 от поверхности болота до минерального грунта включительно (Савичев, 2023).



(a)



(b)

Рисунок 1. Схема расположения полигона (а) и точек исследования (б) на Обском болоте

В настоящей работе представлены результаты исследования органического вещества торфов, отобранных по глубине скважин Н2, Н3. До начала работ образцы торфа хранились в морозильной камере при температуре минус 20 °С. Образцы размораживали и затем сушили до постоянного веса. Содержание влаги в образцах измерялось по потере веса. Далее выделяли битумоид путем экстракции хлороформом в аппарате Сокслета. Полученные экстракты (хлороформный битумоид) анализировались методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии. Хромато-масс-спектрометрический анализ проводили

на приборе Agilent 7890В (ГХ)-Agilent Q-TOF 7200 (МС) на кварцевой капиллярной колонке DB-5ms, длина 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм, толщина слоя 0,25 мкм. Температура испарителя составляла 300 °С, начальная температура термостата колонки 40 °С, затем нагрев со скоростью 5 °С/мин до 150 °С, далее нагрев со скоростью 3 °С/мин до 310 °С и выдержка при 310 °С в течение 20 мин. Для количественного определения компонентов использовались соответствующие стандарты. Характеристики торфяных образцов, отобранных из скважин Н2 и Н3, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Характеристика отобранных образцов торфа.

Образец	Скважина	Глубина отбора, м	Выход хлороформного битумоида, % масс.	Влажность, % масс.
Скважина Н2				
Н2-23	Н2	0,00-0,25	8,32	92,38
Н2-24	Н2	0,25-0,50	17,35	90,15
Н2-25	Н2	0,50-0,75	10,22	82,73
Н2-33	Н2	2,50-2,75	4,92	78,57
Н2-45-46	Н2	5,50-6,00	1,29	30,62
Скважина Н3				
Н3-67	Н3	0,00-0,25	14,07	84,85
Н3-68	Н3	0,25-0,50	8,79	89,33
Н3-69	Н3	0,50-0,75	3,68	89,21
Н3-77	Н3	2,50-2,75	6,48	81,46
Н3-85	Н3	4,50-4,75	0,79	63,19
Н3-86	Н3	4,75-5,00	1,57	28,48

В составе органического вещества торфяных проб были обнаружены алкановые углеводороды, спирты, жирные кислоты, терпеновые углеводороды, ароматические соединения и ряд других веществ. В составе ОБ торфяных образцов н-алканы представлены в основном соединениями с числом атомов углерода от C_{14} до C_{36} , жирные н-кислоты (ЖК) – от C_8 до C_{20} , н-спирты – от C_{12} до C_{22} . В таблице 2 приведены основные

индексы, рассчитанные на основе распределений н-алканов. Нечетные н-алканы C_{25} , C_{27} , C_{29} , C_{31} , C_{33} , являющиеся маркерами высшей растительности, закономерно доминируют в составе н-алканов во всех образцах. Распределение н-алканов по глубине торфяной залежи неравномерно, с заметной концентрацией алканов в слое под активным горизонтом и последующим снижением содержания к минеральному слою (табл.3).

Таблица 2. Геохимические индексы, рассчитанные на основе MMP н-алканов

Номер образца	CPI	E/O	Pr/Ph	C23	C27	C29	C31	Kсyx	Paq	ACL
Скважина Н-2										
Н2-23	3,17	0,46	0,47	11,40	12,78	13,25	5,60	0,50	0,56	26,94
Н2-24	4,88	0,25	0,65	4,74	7,31	15,70	24,79	0,20	0,19	29,20
Н2-25	3,21	0,41	0,49	9,97	12,42	8,96	10,41	0,51	0,53	27,13
Н2-33	3,25	0,44	0,58	7,72	11,45	13,72	11,50	0,36	0,42	27,57
Н2-45-46	3,16	0,46	0,53	5,66	13,10	16,68	13,57	0,25	0,32	27,82
Скважина Н-3										
Н3-67	2,91	0,41	0,24	7,24	12,47	15,86	12,96	0,32	0,39	27,75
Н3-68	3,42	0,45	0,37	11,25	11,59	10,91	5,63	0,56	0,59	26,73
Н3-69	3,74	0,42	0,37	11,17	11,35	10,72	7,61	0,54	0,57	26,78
Н3-77	3,24	0,41	0,47	10,78	12,80	10,60	7,76	0,52	0,56	27,09
Н3-85	3,43	0,40	0,55	8,77	14,85	16,23	9,42	0,38	0,42	27,39
Н3-86	3,20	0,45	0,33	7,65	12,11	18,40	8,80	0,33	0,38	27,64

Примечание к таблице 2:

- 1) Индекс нечетности $CPI = 0.5 \cdot [(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})]$.
- 2) E/O (even/odd) - коэффициент четности, представляющий собой соотношение четных n-алканов к нечетным n-алканам.
- 3) Pr/Ph – отношение пристана к фитану.
- 4) C_{23} – относительное содержание n-алкана C_{23} (% отн.).
- 5) C_{27} – относительное содержание n-алкана C_{27} (% отн.).
- 6) C_{29} – относительное содержание n-алканов C_{29} (% отн.), преобладает в Осоке.
- 7) C_{31} – относительное содержание n-алканов C_{31} (% отн.).
- 8) $K_{сух}$ – коэффициент сухости торфа, $K_{сух} = (C_{21} + C_{23}) / (C_{21} + C_{23} + C_{29} + C_{31})$.
- 9) P_{aq} – коэффициент, отражающий вклад наземных и водных растений в осадки, $P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$.
- 10) ACL – коэффициент, характеризующий среднюю длину углеродной цепи соединений в составе ОВ, $ACL = (23 \cdot C_{23} + 25 \cdot C_{25} + 27 \cdot C_{27} + 29 \cdot C_{29} + 31 \cdot C_{31} + 33 \cdot C_{33}) / (C_{23} + C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33})$ (Дучко, 2016).

Таблица 3. Концентрации n-алканов, n-жирных кислот, n-спиртов в образцах торфа

Образец	Глубина, м	Концентрация компонентов, мг/г			
		n-алканы	n-жирные кислоты	n-спирты	FA/A
Скважина Н2					
H2-23	0,00-0,25	4,47	14,07	3,10	3,15
H2-24	0,25-0,50	10,24	6,07	3,47	0,59
H2-25	0,50-0,75	8,68	6,13	2,35	0,71
H2-33	2,50-2,75	4,43	5,75	1,87	1,30
H2-45-46	5,50-6,00	1,29	0,81	0,54	0,63
Скважина Н3					
H3-67	0,00-0,25	6,19	11,21	5,21	1,81
H3-68	0,25-0,50	6,86	8,32	2,55	1,21
H3-69	0,50-0,75	2,57	3,19	1,18	1,24
H3-77	2,50-2,75	7,12	8,09	2,33	1,14
H3-85	4,50-4,75	1,00	0,53	0,28	0,53
H3-86	4,75-5,00	1,37	1,20	0,75	0,88

Примечание.

FA/A – индекс, характеризующий степень диагенетической трансформации органического вещества. Индекс равен отношению содержания n-жирных кислот к n-алканам.

В образцах H2-24, H2-45-46, H3-86 наблюдается наибольший вклад наземного растительного органического вещества, что косвенно свидетельствует об изменении климатических и, соответственно, сопутствующих условий торфообразования как в современный период, так и в целом в течение голоцена, в том числе связанных с микробиологическими процессами (табл. 2,3). В составе ОВ образцов торфа n-спирты представлены в основном соединениями с длиной алкильной цепи от C_{12} до C_{24} . В составе ОВ преобладают четные спирты. Максимум в распределении обычно приходится на C_{16} и C_{18} . Жирные n-кислоты представлены в основном соединениями от C_8 до C_{26} , с максимумом при C_{16} и C_{18} , что в целом характерно для высшей растительности. Интересно также отметить обнаружение элементарной серы в скважине Н2 в пробе из слоя на глубине 5,50-6,00 м (H2-45-46) с довольно высоким содержанием сухого остатка 5,15 мг/г. В то же время в скважине Н3 в нижнем горизонте были обнаружены лишь следы серы (0,0038 мг/г). Этот факт хорошо коррелирует с выводом (Savichev et al., 2020) о том, что в верхней части торфяной залежи

преобладают гидроксидные минеральные формы, а в нижней – сульфидные, и в нижней части формируется восстановительный геохимический барьер. Ароматические углеводороды в составе ОВ образцов торфа представлены в основном алкилбензолами, нафталинами, фенантренами, также обнаружены пирен, дибензотиофен (Русских и др., 2020). Фенантрены, нафталины и алкилбензолы могут иметь как природное происхождение, так и являться признаком загрязнения; пирен может накапливаться в результате пожаров. Изменения концентрации алкилбензолов не соответствуют тенденции изменения количества ОВ в образцах торфа (рис. 2). Верхние уровни скважин содержат больше дибензотиофена. Анализ распределения показывает, что содержание нафталинов, фенантронов, пирена и дибензотиофена не изменяется в зависимости от изменения содержания общего ОВ (хлороформного битумоида). В то же время в скважине 3 наблюдается симбиотический характер распределения этих соединений между собой. Характерной особенностью скважины 3 является наличие дифенила, максимальное содержание которого отмечается

в поверхностном слое и на глубине 2,50-2,75 м. Все это может свидетельствовать о привнесении

некоторых из этих веществ в результате антропогенного воздействия (Ma et al. 2014, 2017).

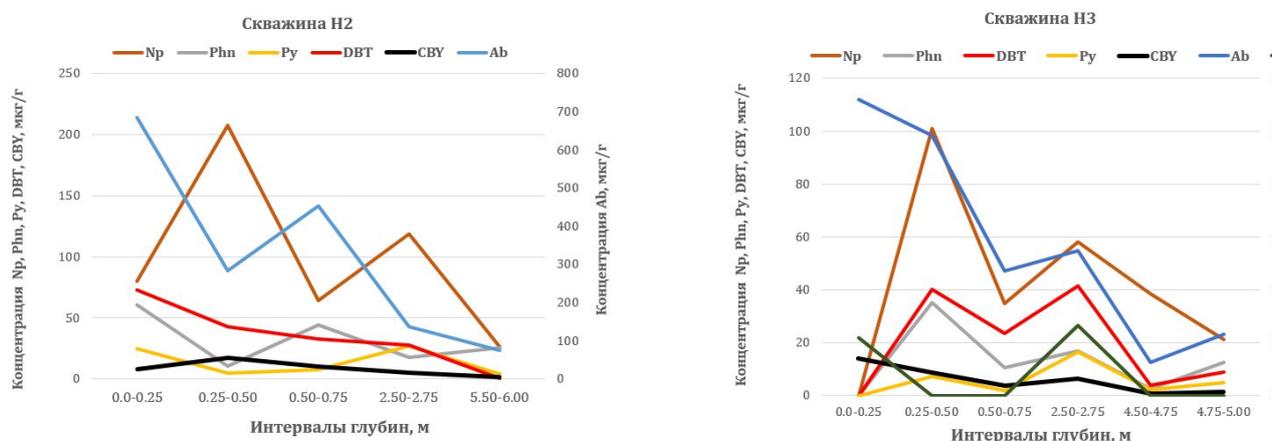


Рисунок 2. Изменение концентрации ароматических углеводородов в зависимости от глубины отбора проб торфа. Слева - данные по скважине Н2, справа - данные по скважине Н3. Np – нафталины, Phn – фенантроны, Py – пирен, DBT – дибензотиофен, CBV – выход хлороформного битумоида, % масс., Ab – алкилбензолы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение 075-10-2021-093).

1. Бернатонис В.К., Трифонова Н.А., Кудашев, И.Г., Бернатонис П.В. (2002) Микрофлора сапропелевых озер Томской области. Известия Томского политехнического университета, 305 (6), 337-347.
2. Дучко М.А. (2016) Геохимия биомаркеров в торфах Юго-Восточной части Западной Сибири. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, Томск, 2016. 149 с.
3. Инишева Л.И., Кира И., Инишев Н.Г. (2017) Заболачивание на Васюганском болоте. Сибирский экологический журнал, Т.24, № 2, с. 119–126.
4. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукса 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.
5. Оленин А., Марков В., Оспенникова Л., Скобеева Е., Хорошев П. (1988). Торфяные ресурсы мира. Москва, «Недра», 384 с.
6. Русских И.В., Стрельникова Е.Б., Серебренникова О.В., Воистинова Е.С., Харанжевская Ю.А. (2020) Идентификация углеводородов в водах болот южной тайги Западной Сибири. Геохимия, Т.65, №4, С. 405-414.
7. Савичев О.Г., Ян Хэнь. (2021). Гидрогеологические и гидрологические условия функционирования Обского и Баксинского болот (юго-восток Западно-Сибирской равнины). Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, Т. 332, № 4, с. 43–56.
8. Савичев О.Г. (2023) Условия и реакция экосистемы эвтрофного Обского болота на антропогенное воздействие. Водные Ресурсы, Водные Объекты, 2023, №1, С. 93-105
9. Ma, C., Ye, S, Lin, T, Ding, X, Yuan, H, Guo, Z (2014) Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of wetlands in the Liao River Delta, Northeast China. Mar Pollut Bull, 80, 160-167.
10. Ma, C., Lin, T., Ye, S., Ding, X., Li, Y., Guo, Z. (2017) Sediment record of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Liaohé River Delta wetland, Northeast China: Implications for regional population migration and economic development. Environ Pollut, 222, 146-152.
11. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. (2020) Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). Applied Geochemistry. V. 113, P.104519

СТОЙКИЕ ХЛОРОРГАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ В ТОРФАХ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ

PERSISTENT ORGANOCHLORINE POLLUTANTS IN OMBROTROPHIC BOG PEATS IN THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA

И.Н.Зубов, А.В. Вельямидова, Е.С. Колпакова, С.Б. Селянина

I.N. Zubov, A.V. Velyamidova, E.S. Kolpakova, S.B. Selyanina

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени акад. Н.П. Лаверова УрО РАН (ФИЦКИА УрО РАН) (г. Архангельск, Россия)
e-mail: zubov.ivan@bk.ru

Одним из наиболее распространенных и, что немаловажно, возобновляемых ресурсов АЗРФ является торф – основной компонент торфяно-болотных экосистем, площадь которых по современным оценкам занимает около 34 % материковых Арктических территорий (*Вомперский и др. 2011; Лиштван и др. 2018*). При этом торфяные залежи европейской части сложены преимущественно торфом верхового типа (*Косов и др. 2007; Parfenova et al. 2016*).

Торф представляет собой уникальный природный ресурс, содержащий широкую гамму химических соединений, что делает его ценным сырьем для разных отраслей промышленности. Наряду с использованием в качестве энергоресурса или сельскохозяйственного субстрата, торф может служить источником множества ценных органических соединений, в том числе, биологически активных (*Fuchsman 1980; Томсон, Наумова 2009; Платонов, Горохова 2016*). Ввиду сравнительно низкой степени воздействия хозяйственной деятельности человека на природные комплексы АЗРФ, торф этих территорий считается «экологически чистым» сырьем, что обуславливает возможность применения продуктов на основе торфа в пищевой, фармацевтической и других отраслях, предъявляющих высокие требования к чистоте продукции.

При этом необходимо понимать, что удаленность от источников поступления загрязняющих веществ не является гарантией экологической чистоты торфяных отложений (*Татаринцева, Котова 2021*), особенно когда речь идет о соединениях, способных к локальному, региональному и даже трансграничному переносу (*АМАР 2015*). В этой связи представляется важным изучить загрязнение торфа хлорорганическими соединениями (ХОС), поступающими как от местных источников, так и в результате глобального переноса от удаленных объектов. Среди всего многообра-

зия ХОС в особую группу выделяют стойкие органические загрязнители (СОЗ) (*Стокгольмская конвенция 2019*). СОЗ характеризуются высокой биологической активностью и многоплановым долгосрочным токсичным воздействием, обладают устойчивостью к деградации, способны к аккумуляции в объектах окружающей среды и жировых тканях живых организмов.

Учитывая отраслевую (лесопромышленную) направленность Архангельской области, актуальной является оценка уровня содержания в торфяных ресурсах стойких хлорорганических загрязнителей на примере гексахлорбензола (ГХБ), пентахлорфенола (ПХФ) и его эфира – пентахлоранизола (ПХА) (*Колпакова, Вельямидова 2019*). Следует отметить, что исследования, направленные на изучение СОЗ в водно-болотных экосистемах РФ, ранее не проводились, а в мире по-прежнему носят эпизодичный характер (*Mohamed 2020; Bao et al. 2023*).

Исследования проведены в верховых торфах Приморского и Мезенского районов Архангельской области. Проанализированы торфа месторождений, находящихся в зоне потенциального воздействия загрязняющих веществ и вне ее. По результатам хроматографического определения получены данные по содержанию и распределению в исследуемых торфах устойчивых токсичных ГХБ, ПХФ, ПХА. Целевые СОЗ были обнаружены во всех проанализированных пробах торфа при заметной вариативности уровней их содержания по районам исследования. Кроме СОЗ в торфах выявлены хлорированные фенолы и их производные разной степени токсичности. Состав обнаруженных хлорфенольных соединений подтверждает поступление загрязняющих веществ переносом с воздушными массами от источников загрязнения, связанных с термическими процессами (сжигание/горение органического топлива в

условиях домашних хозяйств, периодических лесных пожаров и пр.).

Установлено, что максимальное содержание полихлорбензолов, пентахлорфенола и других хлорированных фенолов содержится в верхнем 40-сантиметровом аэрируемом слое торфяной залежи, формирование которого совпадает с этапом «хлорной химии».

Выявленные количества загрязнителей, вероятнее всего, обусловлены их поступлением атмосферным переносом от различных источников на территориях близлежащих регионов и сопредельных государств. Нельзя не учитывать и влияние источников локального загрязнения, связанных с термическими процессами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-27-10029 «Сорбционные свойства торфа как основа геохимических барьерных функций болотных экосистем по отношению к стойким органическим соединениям».

1. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А. и др. (2011) Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. № 5. С. 3-11.
2. Лиштван И.И., Орлов А.С., Селянина С.Б. и др. (2018) Особенности формирования органической части верхового торфа в условиях Европейского Севера России // ХТТ. № 4. С. 5-10.
3. Колпакова Е.С., Вельямидова А.В. (2019) Стойкие органические загрязнители в современных почвах на юге Архангельской области // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 3. С. 32.
4. Косов В.И., Беляков А.С., Белозеров О.В., Гогин Д.Ю. (2007). Торф. Ресурсы, технология, геоэкология. СПб.: Наука. 452 с.
5. Платонов В.В., Горохова М.Н. (2016) Особенности химического состава органической массы торфов и биологическая активность препаратов на их основе // ВНМТ. Т. 10. № 2. С. 1-29.
6. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях с поправками, внесенными в 2019 году [Электронный ресурс]. Текст и приложения. UNEP Chemicals, 2020. 95 с. URL: http://www.pops.int/The_Convention/Overview/Text_of_the_Convention/tabid/2232/Default.aspx. Accessed 15 September 2021/ (дата обращения 29.02.2024)
7. Татаринцева В.Г., Котова Е.И. (2021) Аэротехногенное загрязнение водно-болотных объектов водосбора Белого моря (на примере Архангельской области) // Географический вестник. № 2(57). С. 135.
8. Томсон А.Э., Наумова Г.В. (2009). Торф и продукты его переработки. Минск: Бел. наука. 280 с.
9. AMAP Assessment (2015): Temporal Trends in Persistent Organic Pollutants in the Arctic. Norway, Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 81 p.
10. Bao K., Liu T., Chen M. et al. (2023) Peat records of atmospheric environmental changes in China: A brief review and recommendations for future research perspectives // Catena. V. 229. P. 107-234.
11. Fuchsman C.H. (1980). Peat: Industrial Chemistry and Technology. N. Y.: Acad. press. 298 p.
12. Mohamed Kh. (2020) Dioxins in peat and its formation: An overview // Cogent Environmental Science. V. 6. N. 1. P. 1864870
13. Parfenova L.N., Selyanina S.B., Trufanova M.V. et al. (2016) Influence of climatic and hydrological factors on structure and composition of peat from northern wetland territories with low anthropogenic impact // Sci. Total Environ. V. 551-552. P. 108-115.

ИЗУЧЕНИЕ ФЕНОМЕНА УСТОЙЧИВОСТИ БУГРИСТОГО БОЛОТА НА МОНЧЕГОРСКОЙ ТЕХНОГЕННОЙ ПУСТОШИ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

THE STUDY OF PALSA MIRE STABILITY PHENOMENON ON THE MONCHEGORSK TECHNOGENIC WASTELAND (MURMANSK REGION)

*П.А. Игнашов¹, П.А. Рязанцев², С.А. Кутенков¹
P.A. Ignashov¹, P.A. Ryazantsev², S.A. Kutentkov¹*

¹ Институт биологии – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск, Россия)

² Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН (г. Петрозаводск, Россия)

E-mail: paul.ignashov@gmail.com, chthonian@yandex.ru

Бугристые болота (пальза) северного полушария уже достаточно давно рассматриваются как природные индикаторы, основываясь на динамике которых можно делать выводы о климатических изменениях (Parvainen, Luoto, 2007; Seppälä, 2011). Одним из основных факторов, определяющих устойчивость пальза и формирование новых бугров считается отрицательная среднегодовая температура, например, согласно работе Vorren (2017) она не должна превышать -1°C . Исследование температурных трендов за последние 20 лет для северной Фенноскандии, к которой относится и Мурманская область РФ, выявило увеличение температур весной и осенью, а также уменьшение дней экстремально низких температур (Kivinen et al., 2017). Но кроме непосредственно климатических параметров, состояние мерзлоты в пальза связано с такими характеристиками как влажность почв, альbedo поверхности и растительный покров (Jean, Payette, 2014; Mamet et al., 2017). В свете чего особый интерес вызывают бугристые болота, расположенные в пределах техногенной пустоши к северу от г. Мончегорск между озерами Кутыр и Мончезеро (Мурманская обл.). В результате кислотных дождей вызванных деятельностью Мончегорского ГОКа на сегодняшний день вся поверхность болот на указанной территории лишена растительности, и представляет собой преимущественно сухой рыхлый темный торф, который имеет сильно сниженное альbedo. Ранее проведенные исследования показали, что в пределах пустошей значительно нарушен температурный и ветровой режимы (Kozlov, Zvereva, 2007; Кашулина и др., 2020). Однако, на фоне этого и растущих среднегодовых температур, в буграх сохраняются

ядра многолетнемерзлого торфа и мониторинговые исследования показывают достаточно стабильный уровень активного слоя (Barcan, 2010). Поэтому данные природные объекты следует рассматривать как феномен, для которого необходимо выявить факторы, обеспечивающие устойчивость.

В рамках представленной работы было исследовано строение бугра пучения одного из болот рассматриваемой территории. Оно занимает небольшую депрессию среди песчаных валов, на 1–2 м превышающих его поверхность, и полностью лишено растительности. Сам бугор сложной амебовидной формы, занимает всю центральную часть депрессии, за исключением 5–10 м торфяной окантовки вдоль минерального берега (рис. 1). Вытянут на 80 м в северном направлении, общей шириной до 50 м, ширина отдельных лопастей 5–15 м. Высота бугра 60–100 см. На плато бугра вдоль краев лопастей отмечаются трещины шириной 5–10 см. Для оценки строения мерзлого ядра кроме ручных замеров использовался метод георадиолокации, который хорошо зарекомендовал себя при обследовании пальза (Kohout et al., 2014;). Георадаром ОКО-2 с антенным блоком 400 МГц было выполнено 9 профилей, пересекающих бугор с запада на восток.

Ручной зондировкой установлена общая глубина залежи торфа 295 см, которая подстилается глиной с растительными остатками. Верхняя кровля мерзлоты в бугре на глубине 45 см, повторяет форму его поверхности. Торф, залегающий непосредственно под слоем мерзлоты рыхлый и обводненный, по всей видимости, недавно оттаявший. В верхней части бугра мерзлота представляет собой смерзшийся торф с несколькими относительно горизонтальными жилами чистого

льда толщиной 1–5 см. В понижениях (бывших топях) часто также наблюдается мерзлота, вероятно, сезонная, на глубине около 40 см. Грунто-

вые воды стоят на уровне 110 см от поверхности бугра в месте бурения или в 25–40 см от поверхности мочажин.

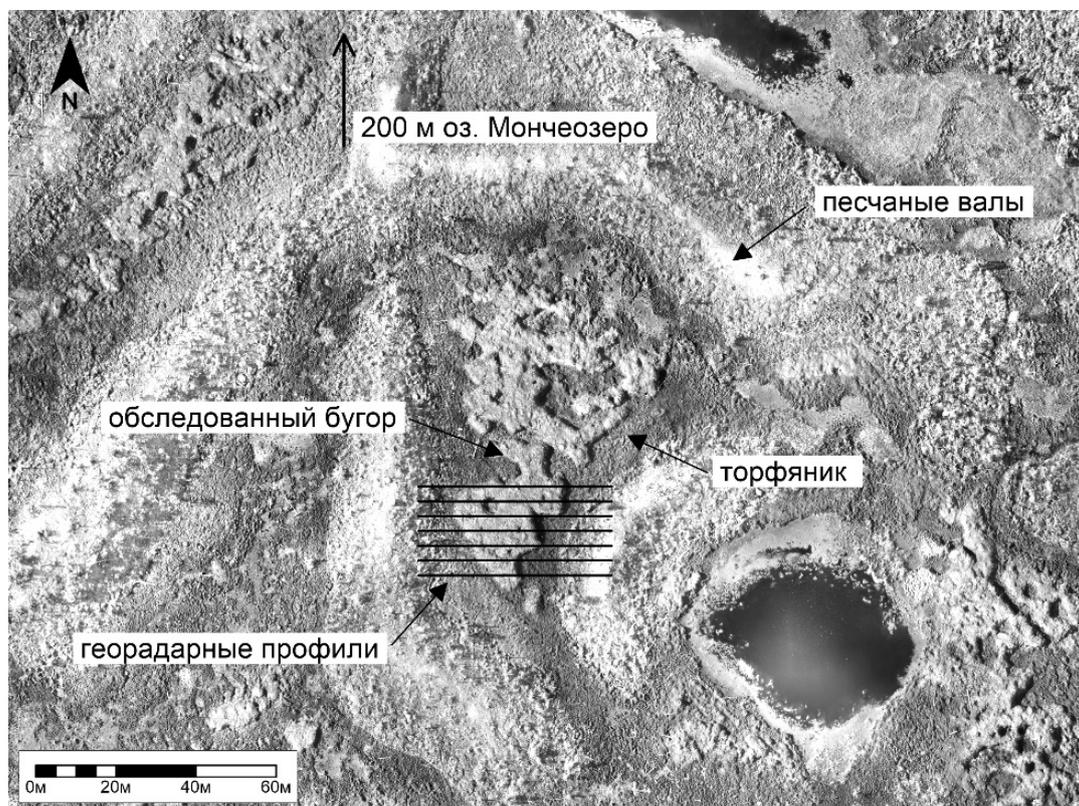


Рисунок 1. Фотография обследованного бугра морозного пучения на Мончегорской пустоши

Георадарные данные подтверждают полученные замеры после выполнения скоростного анализа с использованием скоростей сигнала для сухого торфа 8 см/нс, влажного торфа 6 см/нс, а мерзлоты 10 см/нс. Применение георадиолокации позволило оценить размеры мерзлого ядра: толщина составила порядка 1.5 м, а протя-

женность в поперечном направлении 5–10 м (рис. 2). В целом, несмотря на неблагоприятные климатические факторы и техногенную трансформацию окружающей среды, в исследованном палыза установлено массивное, хорошо сохранившееся ядро мерзлого торфа, без признаков активной деградации.

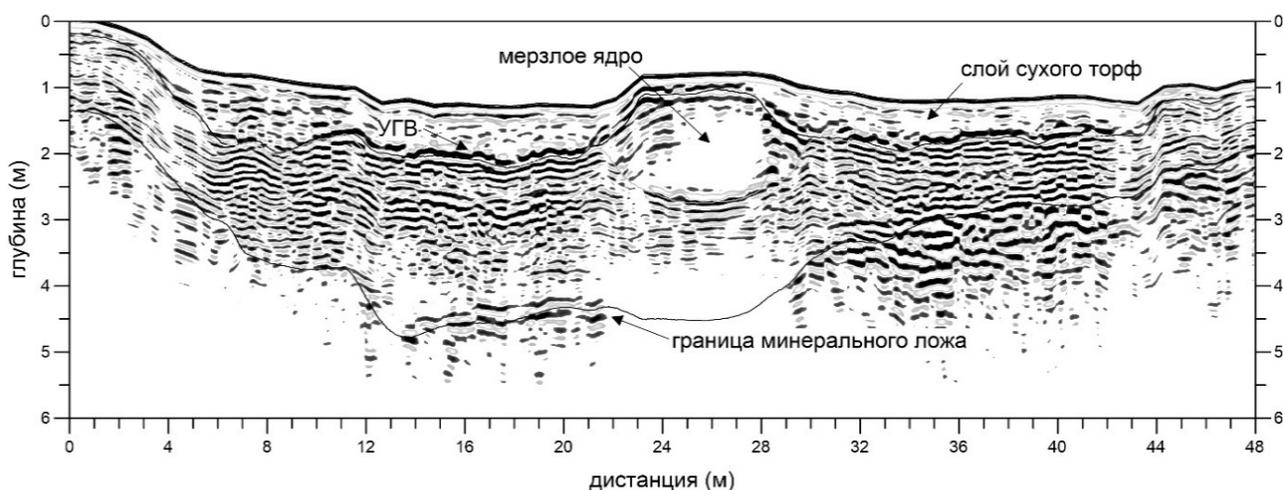


Рисунок 2. Профиль георадарного зондирования через бугор по направлению 3–В

Анализируя полученные результаты, можно выделить некоторые факторы, критически влияющие на устойчивость палъза: (1) Минеральные борта депрессии образованы озерными песками, которые обеспечивают хороший дренаж, снижая латеральное гидротермическое воздействие на мерзлоту (Martin et al., 2019); (2) Из-за уничтожения растительности в районе работ усилились ветра и уменьшился слой снега (Kozlov, Zvereva, 2007), а на техногенных пустошах в холодный сезон ускорилось промерзание почв (Кашулина и др., 2020), что в совокупности может благоприятно влиять на восстановление мерзлого ядра.

Выполненные исследования убедительно показали важность учета комплекса факторов при прогнозе устойчивости субарктических форм криогенного рельефа, таких как палъза или пинго. Выявление таких факторов может достигаться путем комплексного изучения, с привлечением наряду с традиционными подходами новых геофизических и геоинформационных методов. В перспективе бугристые болота на Мончегорской пустоши могут быть хорошим мониторинговым полигоном для выявления региональных климатических сдвигов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 22-77-10055, <https://rscf.ru/project/22-77-10055/>

1. Кашулина Г. М., Литвинов Т. И., Коробейникова Н. М. 2020. Сравнительный анализ температуры горизонта о подзола на двух в различной степени деградированных участках техногенно трансформированной экосистемы (Кольский полуостров) // Почвоведение, 9. С. 1132-1143
2. Barcan, V. S. 2010. Stability of palsa at the southern margin of its distribution on the Kola Peninsula. *Polar Science*, 4(3), 489-495.
3. Jean, M., & Payette, S. 2014. Effect of vegetation cover on the ground thermal regime of wooded and non-wooded palsas. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25(4), 281-294.
4. Kivinen, S., Rasmus, S., Jylhä, K., & Laapas, M. 2017. Long-term climate trends and extreme events in Northern Fennoscandia (1914–2013). *Climate*, 5(1), 16.
5. Kohout, T., Bučko, M. S., Rasmus, K., Leppäranta, M., & Matero, I. 2014. Non-Invasive Geophysical Investigation and Thermodynamic Analysis of a Palsa in Lapland, Northwest Finland. *Permafrost and periglacial processes*, 25(1), 45-52.
6. Kozlov, M.V., Zvereva, E.L. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. 2007. *Rev Environ Sci Biotechnol* 6, 231–259.
7. Mamet, S. D., Chun, K. P., Kershaw, G. G., Loranty, M. M., & Peter Kershaw, G. 2017. Recent increases in permafrost thaw rates and areal loss of palsas in the Western Northwest Territories, Canada. *Permafrost and periglacial processes*, 28(4), 619-633.
8. Martin L.C.P., Nitzbon J., Aas K.S., Etzelmüller B., Kristiansen H., Westermann S. 2019. Stability conditions of peat plateaus and palsas in northern Norway // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. Vol. 124. Pp. 705-719.
9. Parvainen M., Luoto M. 2007. Climate envelopes of mire complex types in Fennoscandia. *Geografiska Annaler*. 89(2). 137–151.
10. Seppälä, M. 2011. Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics. *Quaternary Research*, 75(2), 366-370.
11. Vorren, K.-D. 2017. The first permafrost cycle in Færdesmyra, eastern Finnmark, Norway?. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 71(2), 114–121.

НЕЗАМЕРЗАЮЩАЯ ВЛАГА В СЕЗОННО-ПРОМЕРЗАЮЩИХ БОЛОТАХ СЕВЕРА

NON-FREEZING MOISTURE IN THE SEASONALLY FROZEN WETLANDS OF THE NORTH

И.Л. Калюжный

I.L. Kalyuzhny

Государственный гидрологический институт (г. Санкт-Петербург, Россия)

e-mail: hfl@mail.ru

Отличительной особенностью почвенной влаги, является способность части ее не замерзать при отрицательных температурах. Структура влаги, находящейся в почве, в том числе и в деятельном слое торфяной залежи, формируется под действием разных по характеру сил взаимодействия между молекулами воды: дальнедействующих и короткодействующих (Ананян 1970). При положительной температуре доминируют дальнедействующие силы. При температуре ниже 0 °С короткодействующие силы восстанавливают структуру, свойственную свободной влаге, что и приводит к образованию кристаллов льда. Процесс при понижении температуры происходит до тех пор, пока не останется некоторая часть воды, настолько прочно связанная с частицами льда и почвы, что короткодействующие силы не в состоянии восстановить структуру воды. Остаточная часть почвенной влаги не замерзает вплоть до температуры –100 °С. Толщина пленки этой прочно связанной влаги оценивается в зависимости от температуры в нескольких слоях молекул воды. Установлено, что содержание незамерзшей влаги ($W_{нз}$) зависит от температуры залежи, степени ее дисперсности, физических характеристик, минералогического состава и ряда других факторов.

Она обуславливает льдистость почвы и, как следствие, ряд теплофизических характеристик деятельного слоя болота. Отсутствие последних не позволяет выполнить теплофизические расчеты необходимые при освоении болот в промышленном или ином отношении.

С целью определения её содержания в болотах Севера, были отобраны 8 монолитов верхних горизонтов залежи естественных и осушенных болот Кольского п-ова и прилежащих районов. Монолиты доставлялись в лаборато-

рию, где калориметрическим методом определялось содержание незамерзшей влаги (Кузьмин 1966). Результаты определения $W_{нз}$ в слоях торфа неосушенных и осушенных болот приведены в табл. 1.

Анализ полученных результатов однозначно показывает, что в деятельном слое обследованных болот и минеральных земель содержание $W_{нз}$ присутствует во всем спектре температур от 0 до –15,0 °С и ниже. Причем с понижением температуры содержание $W_{нз}$ уменьшается, образуя при этом две зоны: зону интенсивных фазовых превращений, где изменение содержания $W_{нз}$ при падении температуры на 1,0 °С составляет более чем 10–30 %, и зону затухающих фазовых переходов, где этот показатель существенно меньший и, по мере понижения температуры, приближается к нулю (Калюжный, Лавров 2002).

Полученные зависимости содержания $W_{нз}$ от температуры и плотности деятельного слоя мезоолиготрофного болота (в районе г. Мурманск), в его естественном состоянии, показывают, что зона интенсивных фазовых превращений в верхнем горизонте (0–11 см) охватывает диапазон температуры от 0 до –10 °С. В нижерасположенных горизонтах, начиная с глубины 22–33 см, эта область ограничена температурой –5 °С. Послойное содержание $W_{нз}$ уменьшается по глубине деятельного слоя. Наибольшее её значение наблюдается в самом верхнем слое, где существует в структуре торфа сохранившаяся, при степени разложения 5 ÷ 10 %, внутриклеточная влага. При температуре –0,5 °С, содержание $W_{нз}$ составляет 203–253 % от массы сухого торфа. Увеличенное её в верхних горизонтах сохраняется во всем спектре температур.

Таблица 1. Содержание незамерзшей влаги (в % от массы сухого вещества торфа) в спектре температур и плотности верхних горизонтов болот Кольского п-ова.

Глубина слоя, см	Плотность, г/см ³	Температура, °C								
		-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-3,0	-5,0	-7,0	-10,0	-15,0
Мезоолиготрофное неосушенное болото, г. Мурманск										
0-11	0,060	203	192	183	180	177	165	157	149	143
11-22	0,110	165	155	144	133	122	124	119	113	106
22-33	0,160	138	124	118	111	104	96,4	93,2	92,1	88,2
33-77	0,145	146	133	124	119	118	114	108	106	103
77-99	0,190	118	110	97,7	97,4	95	95,8	95,5	91,8	87,8
99-110	0,390	90,3	73	72,3	65,5	62,1	65,4	51,2	53,3	50,1
Олиготрофное неосушенное болото, г. Кандалакша										
0-10	0,095	215	179	145	138	125	119	115	113	107
10-20	0,060	253	230	210	192	178	153	148	146	141
Мезоолиготрофное неосушенное болото, пос. Лоухи										
0-10	0,120	150	138	128	121	120	115	111	112	111
10-40	0,160	124	103	99	97,8	96,7	95,5	93,6	96,8	89,9
40-0	0,130	134	134	120	113	108		108		106
Болото около г. Мурманск, 26 лет после осушения										
0-20	0,170	127	113	106	101	95	90	86	64,8	82,9
20-30	0,160	137	124	117	106	99	95		91,5	91,1
30-50	0,145	153	134	119	122	112	107	103	100	94,8
50-80	0,180	210	167	163	158	155	149	142	135	124
Болото около г. Кандалакша, 2 года после осушения										
0-10	0,210	110	88,7	80,1	70,6	57,1	52,2	54,8		53,6
10-20	0,185	130	110	96,3	82,7	74,0	76,6	76,6	76,2	74
20-50	0,150	149	123	110	94,6	95,0	89,4	82,0	79,5	83,4
50-110	0,125	163	139	127	117	98,4	96,8	96,6	88,4	87,7
Старая мелиоративная система около пос. Лоухи										
0-10	0,330	73,0	69,0	68,0	60,0	56,0	48,0	50,0	49,5	49,0
10-20	0,300	92,5	82,5	76,0	74,0	62,0	61,0	59,0	56,0	53,0
20-30	0,190	117	100	92,0	85,0	71,5	69,0	66,5	69,0	66,0
30-40	0,150	133	125	111	100	86,5	83,5	77,5	83,5	85,5
40-80	0,125	149	139	120	110	95,4	94,8	93,5		83,8

В табл. 2 приведены результаты определения содержания $W_{нз}$ в деятельном слое и торфяной залежи неосушенного евтрофного болота. Совместный анализ результатов определений, приведенных табл. 1 и 2, показывает, что незави-

симо от типа болотного массива (мезоолиготрофное, олиготрофное или евтрофное) и степени его освоения, характер изменения содержания незамерзшей влаги при изменении температуры во всех типов рассматриваемых болот идентичен.

Таблица 2. Содержание незамерзшей влаги (% от массы сух. вещ.) при различной температуре и плотности неосушенного евтрофного болота Корзинского стационара

Глубина слоя, см	Плотность, г/см ³	Температура, °C								
		-0,5	-1,0	-1,5	-2,0	-3,0	-5,0	-7,0	-10,0	-15,0
0-40	0,06	204	195	187	182	170	165	159	148	139
40-50	0,17	93,5	91,0	85,0	85,0	77,0	79,0	74,0	69,0	59,0
50-80	0,27	75,0	70,0	65,0	62,0	60,0	58,0	62,0	56,0	51,0

Послойное содержание незамерзшей влаги уменьшается по глубине деятельного слоя. При температуре $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ наибольшее ее содержание (203 % от массы сух. вещ. торфа) наблюдается в верхнем слое, на нижних горизонтах (99–110 см) при этой температуре не превосходит 90,3 %. Для каждого из этих горизонтов зависимость $W_{\text{нз}}$ от температуры T [$W_{\text{нз}} = f(T)$] можно выразить полиномиальным уравнением. Для верхнего горизонта деятельного слоя (0–11 см, при плотно-

сти сухого вещества торфа $0,06\text{ г/см}^3$) уравнение имеет вид

$$W_{\text{нз}} = 0,329T^2 + 8,631T + 199 \text{ при коэффициенте корреляции } R = 0,982.$$

На глубине залежи 99–110 см (степень разложения – 18 %, плотность – $0,39\text{ г/см}^3$) содержание $W_{\text{нз}}$ от T описывается уравнением

$$W_{\text{нз}} = 0,277T^2 + 6,315T - 84,3 \text{ при } R = 0,913.$$

В табл. 3 аналитическое выражение этих зависимостей для температур от $-0,5$ и $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3. Содержание незамерзшей влаги (% от массы сух. вещ.) в зависимости от плотности деятельного слоя естественных болотных массивах при постоянных температурах

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Уравнение связи $W_{\text{нз}} = f(\rho)$ при $T = \text{const}$	Коэффициент корреляции
$-0,5$	$W_{\text{нз}} = 38,75 \rho^{-0,64}$	0,96
$-1,0$	$W_{\text{нз}} = 32,36 \rho^{-0,675}$	0,95
$-1,5$	$W_{\text{нз}} = 35,12 \rho^{-0,602}$	0,96
$-3,0$	$W_{\text{нз}} = 31,37 \rho^{-0,609}$	0,96
$-15,0$	$W_{\text{нз}} = 28,75 \rho^{-0,582}$	0,93

Содержание незамерзшей влаги растет с увеличением степени дисперсности почвы. В высокодисперсных средах, в глинах, ее несравненно больше, чем в песках или супесях. В торфах, по мере увеличения степени разложения ее содержание также увеличивается и при большой степени разложения (30–50 %) достигает максимума. В пределах деятельного слоя неосушенных болот наибольшее ее содержание наблюдается в его верхнем горизонте, в котором степень разложения торфа незначительная. Объяснение этому факту мы находим в структуре пористости деятельного слоя, верхние горизонты которого содержат значительное количество внутриклеточной влаги в неразложившихся остатках мохового покрова.

При сельскохозяйственном освоении болот интенсивное увеличение плотности (в 2–3 раза) происходит в слое от поверхности до 30 см. В первые два года освоения, когда удаляют верхний слой торфа с произрастающей растительностью, понижается уровень болотных вод, происходит осадка (до 7–15 см) и плотность верхних слоев достигает $0,17\text{--}0,20\text{ г/см}^3$.

Спустя 20–30 лет после осушения, плотность сухого вещества в пахотном слое достигает $0,26\text{--}0,33\text{ г/см}^3$, т. е. происходит уплотнение с интенсивностью $0,011\text{ (г/см}^3\text{)/год}$. При длительности осушения до 40–60 лет интенсивность повышения плотности снижается и составляет $0,001\text{ (г/см}^3\text{)/год}$ (Нестеренко 1979. Калюжный, Павлова, Лавров 1980).

С глубиной изменения плотности затухают. На старой мелиоративной системе, в районе пос. Лоухи, более 20 лет после осушения,

плотность торфа в верхнем горизонте (0–20 см) составляет $0,30\text{--}0,33\text{ г/см}^3$, на глубине 80 см – $0,125\text{ г/см}^3$. В среднем на глубине 100 см плотность не превосходит $0,150\text{ г/см}^3$. В ряде случаев на этих глубинах изменения крайне незначительные. Уравнение зависимости плотности (ρ , г/см^3) от длительности освоения болота (t , лет, не свыше 30–35 лет) имеет вид (при $R = 0,90$):

$$\rho = -0,000t^2 + 0,012t + 0,11.$$

Изменение плотности сухого вещества торфа влечет за собой и изменение содержания незамерзшей влаги. Анализ табл. 1 показывает, что на мелиорированных болотах, как и на естественных болотных массивах, зависимость $W_{\text{нз}} = f(T)$ сохраняет свои особенности: содержание $W_{\text{нз}}$ уменьшается с понижением температуры. Но послойное содержание незамерзшей влаги на осушенных болотах, в отличие от неосушенных, увеличивается по глубине деятельного слоя. При температуре $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ наибольшее ее содержание (около $0,150\text{ г/см}^3$) наблюдается в нижних горизонтах деятельного слоя.

На осушенном болоте в районе Мурманска на глубине 50 см содержание $W_{\text{нз}}$ равно 210 % от массы сухого вещества торфа, на нижних горизонтах (99–110 см) - не превосходит 90,3 %. Это можно объяснить тем, что на осушенных болотах (при их освоении) в верхних горизонтах деятельного слоя с плотностью больше $0,15\text{--}0,20\text{ г/см}^3$ практически полностью отсутствует внутриклеточная влага, замерзающая при температуре несколько ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а незамерзшая влага внешних пор формируется только на поверхности частиц торфа. Но ниже пахотного горизонта (25–30 см), где торф слабой степени разложения не подвер-

гался значительным воздействиям, сохранились неразложившиеся клетки растительности. Отсюда в слоях от 30 до 60–80 см наблюдается заметное возрастание незамерзшей влаги.

Зависимость $W_{\text{нз}} = f(\rho)$ при $T = \text{const}$ для осушенных болотных массивов близка к ее выражению, что и для неосушенных. Аналитическое выражение зависимости для $T = -0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ принимает вид:

$$W_{\text{нз}} = 34,36\rho^{-0,733}, \text{ при } R = 0,93;$$

для $T = -3 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$W_{\text{нз}} = 25,15\rho^{-0,726}, \text{ при } R = 0,86.$$

На основе экспериментальных определений количества незамерзшей воды от темпера-

туры ($T, \text{ }^\circ\text{C}$) и плотности сухого вещества торфа ($\rho, \text{ г/см}^3$) получена зависимость $W_{\text{нз}} = f(\rho, T)$ в виде:

$$W_{\text{нз}} = 1/\rho^{0,69} (0,014T^{0,3} + 0,016),$$

где $W_{\text{нз}}$ – содержание незамерзшей влаги, % от массы сухого вещества торфа.

Погрешность расчета составляет $\pm 15\%$.

Формула справедлива для олиготрофных и мезоолиготрофных, естественных и осушенных болот Севера ЕТР в интервале плотностей от 0,060 до 0,400 г/см³. С помощью этой зависимости, возможно прогнозировать содержание $W_{\text{нз}}$ при различных температурах, если известна динамика плотности в процессе осушения и освоения болота.

1. Ананян А. А. 1970. Вода в горных породах, миграция ее при промерзании. Связанная вода в дисперсных системах. М.: Изд-во МГУ. Вып. 1. С. 146–154.
2. Кузьмин П. П. 1966. Калориметрический метод определения льдистости мерзлой почвы. Труды ГГИ. Вып. 135. С. 158–171.
3. Калюжный И. Л., Лавров С. А. 2002. Содержание незамерзшей влаги в почвах речных водосборов при отрицательных температурах. Метеорология и гидрология. № 10. С. 58–67.
4. Нестеренко И.М. 1979. Мелиорация земель Европейского Севера СССР. Л.: Наука. 356 с.
5. Калюжный И. Л., Павлова К. К., Лавров С. А. 1988. Гидрофизические исследования при мелиорации переувлажненных земель. Л.: Гидрометеоиздат. 261 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПИРОГЕННЫХ ПРОСЛОЙКАХ И ВЫШЕЛЕЖАЩИХ СЛОЯХ ТОРФА ВЕРХОВОГО БОЛОТА, ПРОЙДЕННОГО ПОЖАРАМИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONCENTRATIONS OF CHEMICAL ELEMENTS IN PYROGENIC LAYERS AND OVERLYING PEAT LAYERS OF RAISED BOG PASSED BY FIRES

Л. В. Карпенко
L. V. Karpenko

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН - обособленное подразделение Федерального исследовательского центра СО РАН (г. Красноярск, Россия)
e-mail karp@ksc.krasn.ru

Верховые облесенные болота среднетаежной подзоны Приенисейской Сибири, окруженные преимущественно сосняками лишайниковыми и зеленомошными, периодически испытывают воздействие низовых пожаров разной интенсивности. Маркерами пожаров являются пирогенные прослойки и угли, встречаемые в торфяной залежи болот на разной глубине. Они фиксируются как при бурении залежи, так и выявляются с помощью ботанического анализа торфа. Как отмечалось ранее (Ефремова, Ефремов, 1994; Куценогий и др., 2003 и др.), в продуктах горения лесной подстилки и торфа происходит значительное увеличение концентраций К, Сг, Тi, Ge, Se, Zr и др. Даже слабый пожар приводит к повышению зольности торфяных почв на 59 %, сильный – на 172 % по сравнению с фоном (Ефремова и др., 2021).

Цель настоящей работы – проанализировать содержание химических элементов в пирогенных прослойках верхового торфяника и в смежных с ними вышележащих слоях торфа, не затронутых пожаром. Объектом исследования являлось олиготрофное сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям) с мощностью торфяной залежи 4,15 м и возрастом – 13617 ± 190 калиброванных лет назад (кал. л. н.). Оно расположено в долине р. Хойбы, правого притока р. Дубчес. Географические координаты – $60^{\circ}49' \text{ с. ш.}, 89^{\circ}23' \text{ в. д.}$ Точка бурения расположена в 250 м от кромки леса, в обводненной части болота. Основными методами исследований являлись ботанический и радиоуглеродный анализы торфа, а также метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (анализ химических элементов).

По схеме лесопожарного районирования, территория относится к Сымскому лесопирологическому округу. Горимость лесов здесь умерен-

ная, однако беглые пожары возможны в течение всего сезона (Софронов, Волокитина, 1990). Ранее по данным ботанического состава, «индекса влажности» и радиоуглеродного датирования торфа была проведена реконструкция смен растительного покрова, выявлены стадии развития болота и их временной интервал (Карпенко, Прокушкин, 2018, 2019). Установлено, что смены растительности носили, преимущественно, континуальный характер. Однако на глубинах 3,30–3,25, 3,20–3,15, 2,95–2,90, 2,70–2,65 м отмечены пирогенные прослойки и угли, которые свидетельствуют о том, что в плавный характер смен вторгались также внешние факторы – пожары. Общая характеристика пройденных пожаром и смежных с ними выше слоев торфа по глубине торфяной колонки приведена в таблице 1.

Как следует из таблицы, все четыре пары слоев (вышележащий и пирогенный) мало отличаются по ботаническому составу и степени разложения торфа. Растения-торфообразователи в пожарных прослойках не утратили свою первоначальную анатомическую структуру и хорошо поддаются идентификации, что говорит о слабой деструкции торфа и незначительном воздействии на него пирогенного фактора. По нашему мнению, пожары, которые зафиксированы во время 9292, 8436, 6562 и 5767 кал. л. н., являлись низовыми низко- или среднеинтенсивными, а основной их причиной, вероятно, были аномально засушливые весенне-летние сезоны, обусловленные сухим и теплым климатом бореала и атлантики. Гидрологический режим болота в эти временные интервалы отличался наименьшим значением «индекса влажности» (варьирование от 4,3 до 2,1). Содержание некоторых химических элементов в пирогенных и смежных сверху с ними слоях торфа приведены в таблице 2.

Таблица 1. Общая характеристика исследованных слоев торфа до и после пожара

Глубина образца, м	Состав растений-торфообразователей, в %	Вид торфа	Степень разложения, %	Индекс влажности	Возраст торфа, кал. л. н.
2,60–2,65	Кора и древесина березы – 70, кора сосны – 10, хвощ (<i>Equisetum palustre</i>) – 5, пушица (<i>Eriophorum vaginatum</i>) – 5, осоки (<i>Carex lasiocarpa</i> , <i>C. cespitosa</i>) – 5, <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Sph. fuscum</i> – 5.	Березовый	35	2,1	5608
2,65–2,70	Кора и древесина березы – 60, кора сосны – 10, хвощ – 5, пушица – 10, осоки – 5, <i>Sph. magellanicum</i> , <i>Sph. fuscum</i> – 10.		40	2,2	5767
2,85–2,90	Кора и древесина березы – 80, пушица – 20, осоки те же – ед.	Березовый	40	2,1	6403
2,90–2,95	Кора и древесина березы – 80, хвощ – 10, пушица – 10, осоки – ед., папоротник – ед.		40	2,2	6562
3,10–3,15	Пушица – 60, кора березы – 30, хвощ – 10, сфагновые мхи <i>Sph. magellanicum</i> , <i>S. angustifolium</i> – 10.	Пушицевый	35	3,2	8008
3,15–3,20	Кора и древесина березы – 40, пушица – 30, хвощ – 30, сфагновые мхи – ед., осоки – ед.	Древесно-травяной	40	4,3	8436
3,20–3,25	Кора и древесина березы и сосны – 35, пушица – 40, хвощ – 20, осоки – 5.	Древесно-травяной	40	4,3	8864
3,25–3,30	Кора и древесина березы и сосны – 35, пушица – 45, осоки (<i>C. cespitosa</i> , <i>C. lasiocarpa</i> , <i>C. globularis</i> , <i>C. rostrata</i> и др.) – 10, хвощ – 10.		40	4,3	9292

Примечание: темным фоном выделены пирогенные прослойки

Таблица 2. Содержание химических элементов в исследованных слоях торфа, мг/кг

Глубина слоя, м	2,60–2,65	2,65–2,70	2,85–2,90	2,90–2,95	3,10–3,15	3,15–3,20	3,20–3,25	3,25–3,30
Вид торфа	Березовый		Березовый		Пушицевый	Древесно-травяной	Древесно-травяной	
Ca	5248	6320	5945	6248	7280	5230	4360	4308
Mg	650	708	670	730	752	611	734	645
K	207	120	213	178	174	152	220	218
Na	81	100	75	81	128	144	88	50
Fe	1562	2033	1833	1756	3051	2876	3056	2595
Al	1623	1155	1514	1623	1156	1559	2125	2426
Li	0,161	0,098	0,149	0,126	0,043	0,029	0,115	0,31
Be	0,078	0,056	0,075	0,071	0,048	0,063	0,082	0,074
Sc	0,59	0,50	0,62	0,54	0,26	0,34	0,60	0,88
Ti	38,4	28,9	47,4	44,2	31,4	30,7	56,8	75,5
Cr	2,84	2,01	2,72	3,06	2,04	2,18	3,10	5,42
Mn	23,5	24,9	29,8	27,5	27,8	25,4	28,2	33,6
Co	0,73	0,59	0,54	0,48	0,65	0,69	0,55	0,71
Ni	5,71	5,00	5,63	6,12	5,11	4,84	4,27	5,07
Cu	4,56	3,75	4,25	4,02	3,28	2,49	2,43	1,40
Zn	10,4	6,13	9,57	10,0	8,24	7,10	9,28	6,14
Ge	0,118	0,121	0,149	0,155	0,112	0,202	0,145	0,187
As	0,23	0,27	0,26	0,18	0,31	0,34	1,26	7,11
Se	0,20	0,19	0,54	0,44	0,28	0,24	0,47	0,82
Rb	0,58	0,35	0,69	0,73	0,40	0,61	0,52	0,82

Продолжение табл. 2

Sr	46	44	44	42	47	32	35	36
Y	1,22	1,00	1,27	1,33	1,04	0,95	1,07	1,16
Zr	1,03	0,95	1,17	1,21	0,51	0,81	1,19	2,23
Nb	0,074	0,042	0,072	0,065	0,042	0,061	0,094	0,132
Mo	0,118	0,125	0,157	0,083	0,143	0,067	0,048	0,040
Cd	0,063	0,089	0,091	0,078	0,083	0,085	0,069	0,075
Sn	0,061	0,086	0,085	0,088	0,069	0,079	0,071	0,078
Sb	0,034	0,051	0,035	0,046	0,041	0,058	0,066	0,046
Cs	0,072	0,060	0,061	0,057	0,028	0,117	0,087	0,083
Ba	78,3	70,7	68,7	74,9	61,1	70,6	67,8	56,9
La	1,08	0,84	1,20	1,17	0,55	0,96	1,19	1,47
Ce	2,25	1,70	2,40	2,34	1,18	2,19	0,04	3,12
Pr	0,210	0,189	0,263	0,210	0,130	0,28	0,34	0,34
Nd	1,03	0,78	1,00	0,96	0,54	1,37	1,21	1,37
Sm	0,170	0,147	0,190	0,203	0,117	0,25	0,26	0,28
Gd	0,231	0,183	0,223	0,236	0,139	0,25	0,30	0,31
Tb	0,025	0,024	0,029	0,030	0,022	0,036	0,038	0,040
Dy	0,138	0,143	0,177	0,165	0,124	0,232	0,194	0,226
Ho	0,030	0,032	0,038	0,035	0,028	0,038	0,043	0,047
Er	0,123	0,111	0,132	0,152	0,126	0,162	0,128	0,157
Tm	0,014	0,015	0,017	0,018	0,015	0,020	0,019	0,020
Yb	0,117	0,098	0,112	0,109	0,103	0,119	0,144	0,137
Lu	0,016	0,016	0,018	0,016	0,015	0,025	0,021	0,021
Hf	0,036	0,024	0,040	0,032	0,022	0,061	0,055	0,065
Ta	0,003	0,173	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Tl	0,003	0,002	0,007	0,002	<0,001	<0,001	0,002	0,005
Pb	0,37	0,39	0,56	0,51	0,40	0,08	0,09	0,67
Bi	0,004	0,004	0,006	0,004	0,004	0,008	0,011	0,012
Th	0,217	0,176	0,295	0,264	0,125	0,34	0,370	0,42

Сравнение содержания химических элементов в слоях залежи (интервал 2,65–2,60 и 2,70–2,65) м, образованных березовым торфом показало, что в пирогенной прослойке наблюдается слабое увеличение таких зольных элементов, как Ca (в 1,2), Mg (в 1,1), Na (в 1,2) и Fe (в 1,3) раза. В тоже время отмечено снижение концентраций K (в 1,7), Al (в 1,4), Co (в 1,2), Ni (в 1,1), Cu (в 1,2), Zn (в 1,7) раз. Во второй пирогенной прослойке (2,95–2,90 м), образованной таким же видом торфа, происходит также слабое накопление (в целом 1,1) раз Ca, Mg, Na, Al, Ni, Zn и уменьшение на такую же величину (1,1–1,2) раза K, Fe, Co, Cu. Сравнение слоев торфа, образованных пушицевым и древесно-травяным видами торфа (интервал глубин 3,15–3,10 и 3,20–3,15) м показало небольшое увеличение в пирогенной прослойке (в 1,1 и 1,3) раза Na и Al и уменьшение (в 1,4–1,1) раз таких элементов, как Ca, Mg, K, Fe, Cu, Zn. Содержание Pb уменьшилось в 5 раз. В последней пирогенной прослойке (3,30–3,25 см,

древесно-травяной торф) содержание Ca, Mg, K почти не изменилось. Отмечено слабое накопление Al (в 1,1), Co (в 1,3), Ni (в 1,2) и сильное – Pb (в 7,4) раза. Сократилось содержание Fe, Na, Cu, Zn (в 1,1–1,7) раз.

В контактных (вышележащий и пирогенный) слоях сравнивали также концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) – скандия (Sc), иттрия (Y), лантана (La), церия (Ce), празеодима (Pr), неодима (Nd), самария (Sm), европия (Eu), гадолиния (Gd), тербия (Tb), диспрозия (Dy), гольмия (Ho), эрбия (Er), тулия (Tm), иттербия (Yb) и лютеция (Lu). Установлено, что в пирогенной прослойке на глубине 2,70–2,65 м, образованной березовым торфом, отмечается увеличение концентраций Y, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho, Er, Tm, Yb, а в слое 2,95–2,90 м превышено содержание всех РЗЭ, кроме Ho. В пирогенной прослойке на глубине 3,20–3,15 м, образованной пушицевым торфом, наблюдается увеличение концентраций Sc, Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. В последней прослой-

ке, на глубине 3,30–3,25 м, сложенной древесно-травяным торфом, превышение концентрации наблюдается по всем РЗЭ, кроме Се, Nd, Dy, Er, Lu.

Из литературных источников (Краснощек, 2014; Ефремова и др., 2021), следует, что концентрирование химических элементов в пирогенных прослойках зависит от интенсивности пожаров. В нашем случае, незначительную разницу в содержании зольных элементов в пирогенных и вышележащих слоях можно объяснить воздействием пожара низкой интенсивности и слабым выгоранием торфяной залежи. Что касается концентрации редкоземельных элементов в пироген-

ных прослойках, то в них фиксировано накопление почти всех РЗЭ.

В заключение необходимо отметить, что сухие климатические условия голоцена (бореальный и первая половина атлантического периодов), способствовали активизации пожарной активности в районе исследований. И, несмотря на то, что эти пожары были низко интенсивными, они способствовали дополнительному обогащению торфяной залежи зольными элементами, что, в конечном итоге, привело к усилению на болоте лесообразовательного процесса и к формированию евтрофных березово-травяных и березовых фитоценозов.

Исследование выполнено в рамках Базового проекта ФИЦ КНЦ СО РАН FWES-2024-0028 «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты»

1. Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // Экология. 1994. № 5. С. 27–34.
2. Ефремова Т. Т., Пименов А. В., Ефремов С. П., Аврова А. Ф. Влияние лесоторфяных пожаров на почвы и потери углерода в фитогенных микроповышениях горных болот юга Средней Сибири // Сиб. экол. журн. 2021. № 3. С. 351–363.
3. Карпенко Л. В., Прокушкин А. С. Генезис и история послеледникового развития лесного болота в долине р. Дубчес // Сиб. лесной журн. 2018. № 5. С. 33–44.
4. Карпенко Л. В., Прокушкин А. С. Реконструкция пожаров в девственных лесах средней тайги Приенисейской Сибири в голоцене // Сиб. лесной журн. 2019. № 5. С. 61–69.
5. Краснощек Ю. Н. Влияние пирогенного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Сиб. лесной журн. 2014. С. 43–52.
6. Куценогий К. П., Чанкина О. В., Ковальская Г. А., Савченко Т. И., Иванова Г. А., Иванов А. В., Тарасов П. А. Постпирогенные изменения элементного состава лесных горючих материалов и почв в сосновых лесах Средней Сибири // Сиб. экол. журн. 2003. № 6. С. 735–742.
7. Софронов М. А. Волокитина А. В. Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука. 1990. 205 с.

СОДЕРЖАНИЕ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АЗОТА В ПОЧВАХ АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ТАРМАНСКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА

CONTENT AND ISOTOPIC COMPOSITION OF NITROGEN IN SOILS OF THE DISTURBED ECOSYSTEMS OF THE TARMANSKOYE FEN

*В.Н. Колотыгина^{1,2}, Е.А. Солдатова^{1,2}, А.О. Константинов¹, А.О. Курасова¹,
Е.С. Плотникова¹*

V.N. Kolotygina¹, E.A. Soldatova¹, A.O. Konstantinov¹, A.O. Kurasova¹, E.S. Plotnikova¹

¹ Тюменский государственный университет (г. Тюмень, Россия)

² Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Московская область, Россия)

E-mail: mns@vkolotygina.ru

Исследование посвящено изучению влияния антропогенной деятельности на динамику азота в Тарманском болотном массиве, представляющем собой значительный озерно-болотный комплекс в подтаежной зоне Западной Сибири (Земцов и др., 1998). Регион, известный своими обширными торфяниками, подвергся масштабной осушительной мелиорации в середине XX века для облегчения добычи торфа, используемого в энергетических целях (Ануфриева и др., 2001). Исследование фокусируется на участках южной периферии Тарманского массива и направлено на анализ профильного распределения общего азота и изотопного состава азота в почвах в зависимости от характера антропогенного воздействия. Методы высокотемпературного каталитического окисления и EA-IRMS использовались для определения содержания общего азота и соотношения стабильных изотопов азота соответственно. Содержание общего азота (TN) в выбранных для анализа почвенных разрезах варьировало от 0.01 до 4.23%, причем заметные изменения величины данного показателя были характерны как для разных горизонтов, так и для профилей, иллюстрирующих различные участки. Было отмечено, что для почв нарушенных участков болота отмечается более выраженная диф-

ференциация содержания TN по глубине, когда основные запасы азота сосредоточены в верхней части профиля (30–40 см), в то время как в нижней части (70–100 см) данная величина снижается до 0.01%. С другой стороны, в почвах участков Тарманского болота, подверженных менее интенсивной трансформации, снижение содержания азота с глубиной не так выражено, за исключением отдельных профилей. Значения $\delta^{15}\text{N}$ варьируются от -4.0 до $+7.4$ ‰ и не демонстрирует единообразной тенденции изменения с глубиной, что, по всей видимости, обусловлено особенностями биогеохимического цикла азота в органических гидроморфных почвах подтайги, так и влиянием антропогенного фактора (Soldatova и др., 2024). Наиболее приближено к естественному изменению $\delta^{15}\text{N}$ с глубиной в торфяных почвах изолированного слаборазрушенного болота. Таким образом, исследование подчеркивает важность озерно-болотных комплексов в подтаежной зоне Западной Сибири для понимания биогеохимических процессов и влияния антропогенных изменений на экосистемы. Полученные данные могут быть использованы для разработки стратегий сохранения и рационального использования торфяных болот, учитывая их роль в глобальном углеродном цикле и водном балансе.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 23-77-10012.

1. Ануфриева Л.И., Шиверских И.А., Кривенкова Г.Г. Эколого-геологическое картографирование масштаба 1:200 000 территории листов О-41-XXIV, XXX. Отчет Восточной съемочной эколого-геологической партии за 1993-2001 г.г.: геологический отчет. Тюмень, 2001. – 1541 л.
2. Земцов А.А., Мезенцев А.В., Инишева Л.И. Болота Западной Сибири: их роль в биосфере. Томск: ТЦНТИ, 1998. 72 с.
3. Soldatova E., Krasilnikov S., Kuzyakov Y. Soil organic matter turnover: Global implications from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ signatures // Science of The Total Environment. – 2024. – Т. 912. – 169423.

ОСОБЕННОСТИ ИОННОГО СОСТАВА БОЛОТНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

Л.В. Литвинов

Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)
e-mail: l.l.v.86@icloud.com

Введение. Торфяники Западной Сибири являются значимыми хранилищами органического углерода и вносят значимый вклад в углеродный баланс планеты (Tugunen J., 2001). Бореальная зона Западной Сибири в большей степени представлена олиготрофными болотами, для которых основным источником минерального питания являются осадки. Для таких ландшафтов характерно малое разнообразие растений (Терентьева И.Е., 2021). Особенностью данных экосистем является доминирование сфагновых мхов, которые являются эдификаторами, способными жить в условиях низких концентраций микроэлементов. При этом, для верховых болот свойственно образование различных по видовому составу мозаичных и комплексных структур. Их появление в основном связано с гидрологическим режимом и ландшафтной структурой болота (Иванов К.Е., 1953).

Для богатых микроландшафтов свойственно образование экосистем с большим видовым разнообразием, в сравнении с более бедными территориями (Hartsock J.A., 2021). Особенности гидрохимии различных ландшафтов коррелируют с их трофностью (Bourbonniere R.A., 2009). Для мезоолиготрофных болот характерно образование карбонатно-кальциевых вод, когда для олиготрофных торфяников характерно превалирование хлоридов (Tahvanainen T., 2002). Обилие сосудистых растений также способно влиять на минерализацию болотной воды (Bragazza L., 2006).

В связи с тем, что основным источником минеральных соединений являются вещества, попадающие в болото из атмосферы с осадками, ненарушенные олиготрофные болота являются крайне чувствительными к антропогенной нагрузке (Прейс Ю.И., 2010). Вызванные развитием различных промышленных комплексов нарушения проявляются в изменении химического состава субстрата, что влечёт за собой трансформацию условий среды для проживающей на территории ландшафта растительности (Савичев О.Г., 2016).

В долгосрочной перспективе, мониторинговые наблюдения ионного состава воды могут быть индикатором аэротехногенных нарушений территории и региона в целом (Потапова Т.М.,

Новиков С.М. 2006). Помимо этого, нахождение зависимости между растительным разнообразием микроландшафтов и их гидрохимическими характеристиками позволит обнаружить принципы дифференциации растительных сообществ, а также обозначить влияние антропогенной нагрузки на функционирование экосистемы с возможностью дальнейшего прогнозирования развития растительных сообществ. В ходе исследования будут рассмотрены характерные гидрохимические характеристики для основных экосистем олиготрофных болот.

Объекты и методы. Исследование проводилось на территории международного полевого стационара Мухрино, представленного ненарушенным олиготрофным болотом. Растительность торфяника представлена грядово-мочажинными комплексами с кустарничково-сфагновыми грядами и сфагновыми мочажинами, участками открытого болота с кустарничками, пушицей и редкими низкими соснами. Лесистые фитоценозы представлены рядами (Филиппов И.В., Лапшина Е.Д., 2008).

В ходе исследования было выделено 12 пробных площадей, на которых было заложено от 4 до 13 точек для отбора проб (табл. 1). Исследование охватывает грядово-мочажинные и рямово-мелкомочажинные комплексы, участки открытого болота и типичного ряма.

Таблица 1. Исследуемые участки микрорельефа

Участок	Экосистема	№ ПП
Мочажина	ГМК	1.1–1.4, 3.1–3.6, 6.6–6.10
	Открытое болото	4.1, 4.3, 4.6, 5.3, 5.4, 5.6
	РМК	10.1–10.5, 11.1–11.5, 12.6–12.10
Межкочье	ГМК	2.7, 3.4, 3.9, 3.13, 6.4, 6.12
	Открытое болото	4.1, 4.3, 4.6, 5.3, 5.4, 5.6
	Типичный ряма	7.5, 7.7, 8.1, 8.3, 8.6, 9.1, 9.5
	РМК	12.5, 12.11, 12.13

Кочка	ГМК	2.2, 2.4, 2.5, 2.6, 3.7, 3.8, 3.10-3.12, 6.1, 6.2, 6.5, 6.11, 6.13
	Открытое болото	4.2, 4.4, 4.5, 4.7, 4.8, 5.1, 5.2, 5.5, 5.7, 5.8
	Типичный рям	7.1-7.4, 7.6, 7.8, 8.2, 8.4, 8.5, 8.7, 8.8, 9.2-9.4, 9.6-9.8
	РМК	12.1-12.4, 12.12

Для отбора проб в каждой точке вырезалась лунка глубиной чуть ниже уровня УБВ. Вода отбиралась в стеклянные бутылки объёмом 60 мл. Образцы транспортировались в лабораторию, где фильтровались шприцевыми фильтрами (Whatman 0,45 мкм). Также, во время полевых работ измерялись кислотность и электропроводимость болотных вод.

Определение химического состава воды проходило на ионном хроматографе Metrohm 882 IC Compact plus (Швейцария) с кондуктометрическим детектором. В качестве элюентов были

использованы растворы HNO_3 4 ммоль и $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$ 8 ммоль и 0,25 ммоль соответственно. Для определения ионов были использованы хроматографические колонки Metrosep C4 150/4.0 и Metrosep Supp 19 – 250/4.0. Данная методика позволяет определять ионы Li^+ , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg_2^+ , Ca_2^+ , F^- , Cl^- , Br^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} .

В качестве инструмента статистического анализа был использован метод главных компонентов (PCA), реализованный на языке программирования R. Для выявления более характеризующих ионным составом экосистем, были добавлены переменные с значениями растворённого органического углерода и индексом SUVA, отражающим валовое количество органических соединений, поглощающих UV-излучение при длине волны 254 нм.

Результаты. Полученные в ходе лабораторного анализа данные были использованы для построения двумерной проекции результатов статистической обработки, отражающей предрасположенность точки к определённой характеристике (рис. 1).

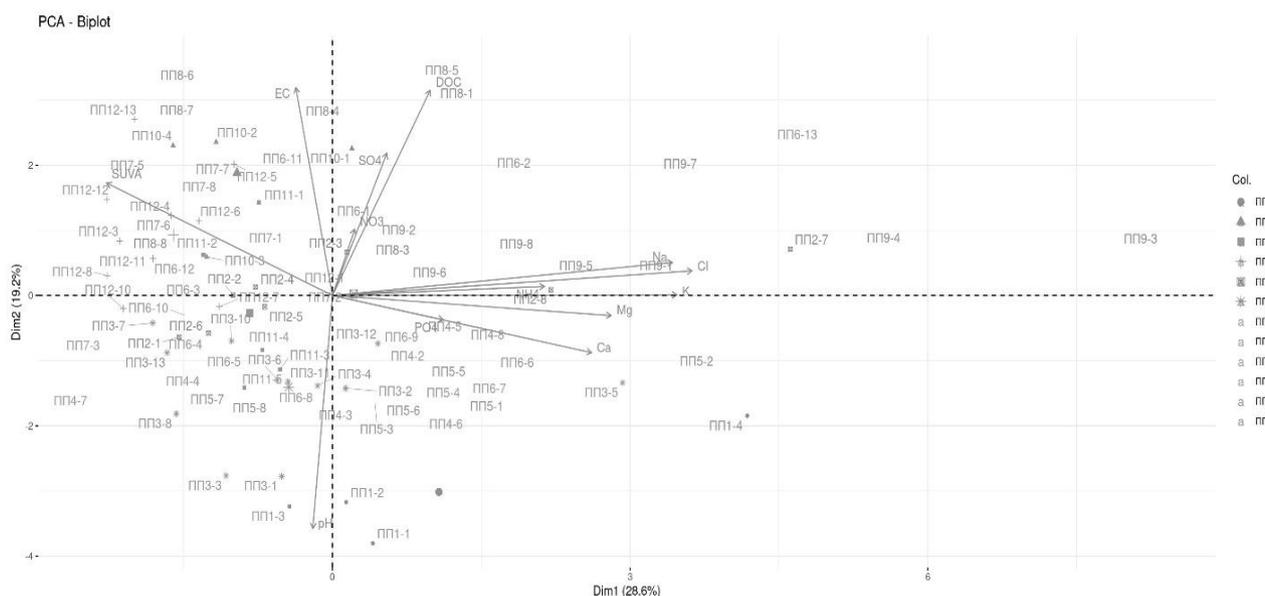


Рисунок 1. результат PCA гидрохимических характеристик экосистем

Из полученных данных следует, что концентрация минеральных соединений, как преобладающий фактор формирования гидрохимии болотной воды более выражен в рямово-мелкомочажинных комплексах и сухих участках экосистем. Выявлено, что увеличение показателя pH характерно для более обводнённых участков. Это связано с уменьшением концентраций всех веществ вследствие разбавления дождевыми водами. Это следует из параметра электропроводности воды и его повышение в рямовых участках с высоким УБВ.

Помимо этого, для рямовых участков характерно увеличение индекса SUVA, что может быть связано с высокой степенью разложения торфа и увеличением доли устойчивых растворённых органических кислот (Добровольская Т.Г., Головченко А.В., 2014). Большая часть мочажин имеет меньшую корреляцию с главными компонентами (рисунок 1). Для данных точек характерно увеличение кислотности при уменьшении электропроводности. Вероятно, это связано с высокой пресностью воды при незначительной роли аэробной деструкции торфа.

1. Добровольская Т. Г., Головченко А. В., Звягинцев Д. Г. Анализ экологических факторов, ограничивающих деструкцию верхового торфа // Почвоведение. – 2014. – №. 3. – С. 304-304.
2. Иванов К. Е. Гидрология болот. СПб.: Гидрометеорологическое издательство, 1953.
3. Потапова Т. М., Новиков С. М. Оценка антропогенных изменений химического состава болотных вод и стока растворенных веществ с территории естественных и мелиорированных верховых болот // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2006. – №. 2. – С. 85-95.
4. Преис Ю. И., Бобров В. А., Сороковенко О. Р. Особенности современной аккумуляции минерального вещества на олиготрофных болотах юга лесной зоны Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – №. 336. – С. 204-210.9.
5. Савичев О. Г. и др. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2016. – №. 5. – С. 60-69.
6. Терентьева И. Е. и др. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2021. – Т. 84. – №. 6. – С. 920-930.
7. Филиппов И. В., Лапшина Е. Д. Типы болотных микроландшафтов озерно-болотных систем Среднего Приобья // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2008. – Т. 1. – №. S1. – С. 115-124.
8. Bourbonniere R. A. Review of water chemistry research in natural and disturbed peatlands // Canadian water resources journal. – 2009. – Т. 34. – №. 4. – С. 393-414.
9. Bragazza L. Heavy metals in bog waters: An alternative way to assess atmospheric precipitation quality? // Global and Planetary Change. – 2006. – Т. 53. – №. 4. – С. 290-298.
10. Tahvanainen T. et al. Spatial variation of mire surface water chemistry and vegetation in northeastern Finland // Annales botanici fennici. – Finnish Zoological and Botanical Publishing Board, 2002. – С. 235-251.
11. Turunen J. et al. Carbon accumulation in West Siberian Mires, Russia Sphagnum peatland distribution in North America and Eurasia during the past 21,000 years // Global biogeochemical cycles. – 2001. – Т. 15. – №. 2. – С. 285-296.

АКТИВНОСТЬ ОКСИДОРЕДУКТАЗ В ВЫРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ

OXIDOREDUCTASE ACTIVITY IN DEVELOPED PEAT SOILS

*Е.А. Лобанова, С.А. Ефимова, Е.В. Порохина**E.A. Lobanova, S.A. Efimova, E.V. Porokhina*

Томский государственный педагогический университет(г. Томск, Россия)

E-mail: porohkatrin@yandex.ru

На территории Западной Сибири торфяные болота занимают площадь в 3442,8 тыс. га., при этом площадь нарушенных торфоразработками земель в Томской области составляет 0,2% от всех торфяных земель. Эти земли расположены в южной части области, которая наиболее освоена в сельскохозяйственном отношении. И практически все выработанные торфяные почвы Сибири, в отличие от аналогичных на европейской территории России, не используется в хозяйстве и характеризуются большей мощностью остаточного слоя торфа (Система показателей современного ..., 2005). Ценность выработанных торфяных почв определяется устойчивостью остаточного слоя торфа к биохимической деструкции при хозяйственном использовании. Исследования биохимических процессов в выработанных торфяных почвах на территории Западной Сибири немногочисленны (Потапова, 1997; Выработанные торфяные месторождения ..., 2007), что также подчеркивает актуальность работы. Важное значение в ходе трансформации органического вещества почв, в том числе и торфяных, имеют окислительно-восстановительные процессы, интенсивность которых регулируется ферментами из класса оксидоредуктаз (Инишева и др., 2003; Хазиев, 2015).

Объектом исследований активности некоторых ферментов из класса оксидоредуктаз послужили торфяные почвы выработанного и рекультивированного участка эвтрофного болота Таган (Западная Сибирь, Томская область, Томский район). Данный участок почти 50 лет использовался для выращивания многолетних трав, в настоящее время он находится в пользовании садоводческого товарищества. На пункте наблюдений почвы не заняты под сельскохозяйственные культуры.

Остаточный слой торфяного профиля на пункте наблюдений имеет мощность 1,4 м, сформирован нормальнозольным древесным видом торфа со степенью разложения 30-70% и подстилается заиленными песками (Выработанные торфяные месторождения ..., 2007). Активность каталазы в отобранных для исследований образцах торфа определяли газометрическим методом (Круглов, Пароменская, 1966), активность полифенолоксидазы и пероксидазы – по методу Л.А. Карягиной, Н.А. Михайловской (Карягина, Михайловская, 1986).

Результаты проведенных исследований показывают, что в остаточном торфяном профиле болота Таган активность каталазы биогенного происхождения изменяется в пределах от 2,7 до 11,3 мл O₂ за 2 мин на 1 г торфа, с максимумом в корнеобитаемом аэробном слое (0-20 см), который богат свежими растительными остатками. Активность полифенолоксидазы по торфяному профилю была распределена неравномерно (от 0,68 до 1,38 мг 1,4-бензохинона за 30 мин на 1 г торфа). Наибольшая активность полифенолоксидазы отмечается в слоях глубже 40 см. Активность пероксидазы изменяется в широких пределах (9,06-19,72 мг 1,4-бензохинона за 30 мин на 1 г торфа). Более высокой активностью фермента отличается нижняя часть торфяного профиля (80-140 см).

Сравнение полученных данных с результатами более ранних исследований активности оксидоредуктаз, проведенных на этом же участке болота в 1999–2001 гг., показывает снижение активности полифенолоксидазы в торфяном профиле (в среднем в 1,5 раза), в то время как активность пероксидазы увеличилась (в 1,7 раз). Одной из причин этого может быть более глубокое преобразование органического вещества торфа, которое произошло за двадцатилетний период.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-26-00161, <https://rscf.ru/project/24-26-00161/>

2. Выработанные торфяные месторождения, их характеристика и функционирование / Л.И. Инишева, Е.В. Порохина, В.Е. Аристархова, А.Ф. Боровкова. – Томск: ТГПУ, 2007. – 185с.
3. Карягіна Л.А., Михайлоуская Н.А. Вызначэнне актыўнасці поліфенолаксідазы і пераксідазы у глебе // Весцы АН БССР. Серыя сельскагаспадарчых навук. – 1986. – № 2. – С.40–41.
4. Круглов Ю.В., Пароменская Л.Н. Модификация газометрического метода определения каталазной активности // Почвоведение. – 1966.– № 1. – С. 93–95.
5. Инишева Л.И., Ивлева С.Н., Щербакова Т.А. Руководство по определению ферментативной активности торфяных почв и торфов. – Томск: ТГПУ, 2003. – 122 с.
6. Потапова С.С. Изменение гумусного и биохимического состояния торфяников низинного типа при первичном освоении: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Новосибирск, 1997. – 17 с.
7. Хазиев Ф.Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник Академии наук Республики Башкортостан.– 2015. – Т. 20.– №2 (78). – С. 14–24.

ГЕОХИМИЯ БОЛОТНЫХ ВОД ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО-НАРУШЕННЫХ РЯМОВ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НОВОСИБИРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

GEOCHEMISTRY OF BOG WATER OF NATURAL AND ANTHROPOGENICALLY DISTURBED RYAMS IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA (NOVOSIBIRSK REGION)

А.Е. Мальцев¹, Г.А. Леонова¹, Ю.И. Прейс², А.А. Ломова¹
A.E. Maltsev¹, G.A. Leonova¹, Yu.I. Preis², A.A. Lomova¹

¹ Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С. СО РАН (г. Новосибирск, Россия)

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

Объектами исследования стали болотные воды трех рямов лесостепной зоны юга Западной Сибири. Антропогенно нарушенное пожарами Убинское горелое болото (55°18'40" с.ш., 79°40'26" в.д.) и Убинское Большое болото (55°18'67" с.ш., 79°42'42" в.д.) расположены в Убинском районе Новосибирской области у с. Убинское и Шерстобитовское болото (54°58'58" с.ш., 81°00'58" в.д.) – в Чулымском районе Новосибирской области у с. Шерстобитово.

Болотные воды Убинского горелого рьяма по преобладающим ионам по относятся к гидрокарбонатному классу группе кальция (табл.), по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ($E_h = +0,310$ В, растворенный O_2 – 4,83 мг/л), по щелочно-кислотным условиям – к классу кислых ($pH = 4,59$), по величине общей минерализации (97,3 мг/л) – к семейству ультрапресных вод. Болотные воды Убинского Большого рьяма по преобладающим ионам относятся к гидрокарбонатному классу группе кальция, по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ($E_h = +0,278$ В, растворенный O_2 – 2,83 мг/л), по щелочно-кислотным условиям – к классу кислых ($pH = 3,73$), по величине общей минерализации (92,1 мг/л) – к семейству ультрапресных вод. Болотные воды Шерстобитовского рьяма по преобладающим ионам относятся к гидрокарбонатному классу группе кальция, по окислительно-восстановительным условиям – к типу окисленных кислородных ($E_h = +0,287$ В, растворенный O_2 – 4,66 мг/л), по щелочно-кислотным условиям – к классу кислых ($pH = 3,76$),

по величине общей минерализации (84,2 мг/л) – к семейству ультрапресных вод.

Процессы разложения растительных остатков приводят к значительному увеличению в болотных водах (в сравнении с дождевой водой) концентраций растворенного органического углерода (РОУ), NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , показателей БПК и ХПК (табл.). Высокие содержания этих компонентов указывают на активные процессы биохимической деструкции и окисления органического вещества. Более высокие показатели ХПК, РОУ, NH_4^+ и SO_4^{2-} в болотных водах Убинского горелого рьяма, по сравнению с Шерстобитовским и Убинским Большим рьямами, являются отражением более значительных нарушений его развития антропогенными факторами: мелиорацией и пожарами. В настоящее время данное болото вернулось на мезотрофную стадию развития. Исчезли сосна и олиготрофные сфагновые мхи, появились листопадные породы деревьев (береза, осина) и кустарники (ивы), эвтрофные осоки, злаки и гипновые мхи. Поэтому в Убинское горелое болото ежегодно поступает больше опада, подверженного процессам разложения, что, соответственно, дает и большее поступление органического вещества. На этом болоте более интенсивному разложению опада и торфа (степень разложения верхнего 30-ти см слоя его залежи составляет 7% против 5% на Шерстобитовском рьяме) способствуют: примыкающее к рьяму озеро и значительное дренирующее влияние более развитой мелиоративной системы, особенно сильное в кратковременные аридные периоды. Все это приводит к повышению значений ХПК, РОУ, NH_4^+ , SO_4^{2-} и т.д.

Таблица. Гидрохимические показатели дождевых и болотных вод исследованных рямов

Показатель	Убинский горелый рям		Убинский рям	Шерстобитовский рям
	дождевая вода	болотная вода	болотная вода	болотная вода
Минерализация, мг/л	12,5	97,3	92,1	84,2
pH	6,54	4,59	3,73	3,76
Eh, мВ	+335	+310	+278	+287
Щелочность, мг-экв/л	0,07	0,02	0	0,01
O ₂ , мг/л	7,33	4,83	2,83	4,66
Окисляемость, мгO ₂ /л	3,76	224	216	180
БПК ₅ , мгO ₂ /л	0,94	6,78	7,5	5,52
ХПК, мгO ₂ /л	9	922	565	682
POУ, мг/л	3,35	145,75	107,10	55,07
HCO ₃ ⁻ , мг/л	4,27	1,22	0,1	0,71
SO ₄ ²⁻ , мг/л	0,4	2,6	0,9	0,5
Cl ⁻ , мг/л	4,0	15,4	2,9	1,4
PO ₄ ³⁻ , мг/л	0,12	0,49	0,42	0,46
NO ₃ ⁻ , мг/л	0,21	16,1	1,24	9,37
NO ₂ ⁻ , мг/л	0,001	0,123	0,129	0,112
NH ₄ ⁺ , мг/л	0,37	145,12	15,06	13,69
Ca ₂ ⁺ , мг/л	1,4	12,8	3,0	3,5
Mg ₂ ⁺ , мг/л	0,24	4,39	2,44	2,25
K ⁺ , мг/л	0,97	2,62	0,72	0,62
Na ⁺ , мг/л	1,06	4,76	1,58	1,21

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-27-00061.

ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БОЛОТ ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В СВЯЗИ С ПОТЕПЛЕНИЕМ КЛИМАТА

CHANGES IN THE WATER-THERMAL REGIME OF SWAMPS IN THE PERMAFROST ZONE OF WESTERN SIBERIA DUE TO CLIMATE WARMING

А.П. Морозов¹, Ю.П. Москвин¹
Anton P. Morozov¹, Iurii P. Moskvina¹

Государственный гидрологический институт (г. Санкт-Петербург, Россия)
e-mail: antonmorozov43@yandex.ru, ypmosk@gmail.com

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

В качестве входных параметров модели используются ежедневные метеорологические данные 23 станций. Продолжительность наблюдений метеостанций составляет от 90 до 140 лет. Указанный период разделен на 2 части, до и после 1978 года.

Результаты расчётов указывают на повсеместное увеличение средних за тёплый период значений температуры воздуха, от 0.3°C на юге до 1.6°C на севере. В наиболее теплые годы (1% обеспеченности) указанное повышение на юге зоны составляет 1.5°C, а на крайнем севере – 3.6°C. Наибольшие изменения в параметрах водно-теплового режима прослеживаются в увеличении глубины оттаивания торфяной залежи. Так в среднем максимальное оттаивание увеличилось на 4-5 см, а в наиболее теплые годы на 7-10 см. Для севера полигональных болот разница в глубине оттаивания в отдельные годы достигает 30 см.

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

Changes in the water-thermal regime of swamps in the permafrost zone of Western Siberia

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

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

The results of calculations indicate a widespread increase in the average warm period air temperature values, from 0.3° in the south to 1.6 in the north of the territory. In the warmest years (1% probability of exceeding) this increase in the south of the zone is 1.5°C and in the extreme north is 3.6°C. The greatest changes in the parameters of the water-thermal regime can be traced in the increase of the peat deposit thawing depth. In average, the maximum thawing increased by 4-5 cm, and in the warmest years by 7-10 cm. For the north of polygonal swamps, the difference in thawing depth in some years increases dramatically and reaches 30 cm. At the same time, it should be noted that the calculated thawing depth often exceeds the peat deposit thickness, especially in the northern part of polygonal swamps. In such cases, the peat deposit thawing values should be considered as potential.

It is supposed that changes in the water-thermal regime of palsa and polygonal swamps will contribute to the sequential evolution of the micro-landscape structure. The displacement of the boundaries of

different types of swamps is complicated by orographic obstacles, primarily by the Siberian Uvals and requires a full-scale reorganization of the hydrographic network and structure of micro-landscapes.

ДЕСТРУКЦИЯ SPHAGNUM FUSCUM НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ РАЗЛОЖЕНИЯ В ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ОСУШЕНИЮ И ПИРОГЕННУМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

DECAYS OF SPHAGNUM FUSCUM AT THE INITIAL STAGES OF DECOMPOSITION IN OLIGOTROPHIC BOGS OF WESTERN SIBERIA AFFECTED TO DRAINAGE AND PYROGENIC IMPACT

Л.Г. Никонова, Е.А. Головацкая
L.G. Nikonova, E.A. Golovatskaya

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)
e-mail: nikonovallig@gmail.com, golovatskayaea@gmail.com

Болотные экосистемы за счет преобладания процессов продукции органического вещества растений и торфа над его деструкцией являются постоянным стоком углерода, а кроме того, играют важную климатообразующую и средообразующую роль. Изучение процессов торфообразования в болотах крайне актуально в контексте изменений климата и антропогенного воздействия. Анализ первых этапов разложения органического вещества в торфе особенно важен, так как именно в этот период происходит наиболее интенсивная деструкция свежей органики поступившей с растительным опадом. Наибольший интерес вызывает динамика и скорость разложения сфагновых мхов, как основных растений-торфообразователей олиготрофных болот Западной Сибири. Целью исследования являлось изучение динамики разложения *Sphagnum fuscum* в антропогенно-трансформированных и находящихся на разных стадиях естественных постпирогенных сукцессий олиготрофных болотных экосистемах Западной Сибири.

Материалы и методики исследования. Исследование проводили на «Бакчарском» болоте на ненарушенном и осушенном фитоценозах (Естественный рям – сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз (56°52'31.7» с.ш., 82°48'27.3» в.д.) и Осушенный рям (56°53'33.3» с.ш., 82°51'08.0» в.д.)), а также на находящихся на разных стадиях естественных постпирогенных сукцессий фитоценозах болота «Иксинское» (Восстановленный рям (56°51'42.1» с.ш., 83°17'53.0» в.д.) и Гарь (сосново-берёзовый пушицево-сфагновый фитоценоз) (56°52'03.4» с.ш., 83°11'52.1» в.д.). Оценка скорости разложения органического вещества растительных остатков проводилась методом закладки растительности в торф (Козловская, 1978, Головацкая, 2017). Исследовали скорость разложения очеса *Sphagnum*

fuscum, образцы которого закладывали в мешочках из синтетического материала, в трехкратной повторности на глубину 10см от поверхности в мае 2023 года, извлекали из торфяной залежи через 1 и 4 месяца после начала эксперимента. В образцах определяли убыль массы весовым методом, в исходных образцах и после исследования определяли содержание углерода и азота при помощи элементного анализатора CNSH-O (VELP Scientifica, Италия). Для оценки запасов фитомассы почвенного покрова болот, а также вклада сфагновых мхов в процессы накопления углерода применяли укосный метод, сбор растительного материала производили в период максимального развития, конец июля – начало августа укосным методом (Kosykh, 2008, Головацкая, 2009). Единицей измерения запасов фитомассы является г/м².

Результаты исследования. Исследуемые фитоценозы расположены в подзоне южной тайги Западной Сибири. Средняя годовая температура составляет 0,50 °С, годовое количество осадков 497 мм за 1991–2020 годы. Средние температуры воздуха января и июля составляют –18,8 и +18,2 °С, соответственно (ВНИИГМИ-МЦД, meteo.ru). В 2023 году в Бакчарском районе средняя температура воздуха за летний период составила 17,1°С, сумма осадков – 259,7мм. Выбранные точки исследования обладают рядом уникальных характеристик, которые могут оказывать значительное влияние на процесс трансформации органического вещества. С 1970-х годов на этих болотах функционирует мелиоративная сеть каналов, в результате чего на территории болот произошли кардинальные изменения природной среды, в частности осушение значительных участков болот, что стало причиной массовых лесных и торфяных пожаров (Базанов, 2002). Согласно оценке запасов растительного веще-

ства (фитомасса: надземные части трав и кустарничков, мох, корни трав и кустарничков; мортмасса: опад, ветошь, очес до 20 см), исследуемые фитоценозы можно расположить по убыванию в следующем порядке: Осушенный рям

(6327 г/м²), Восстановленный рям (5151 г/м²), Естественный рям (3519 г/м²), Гарь (2097 г/м²). Характер растительного покрова определяет соотношение разных фракций фитомассы фитоценозов (рис. 1).

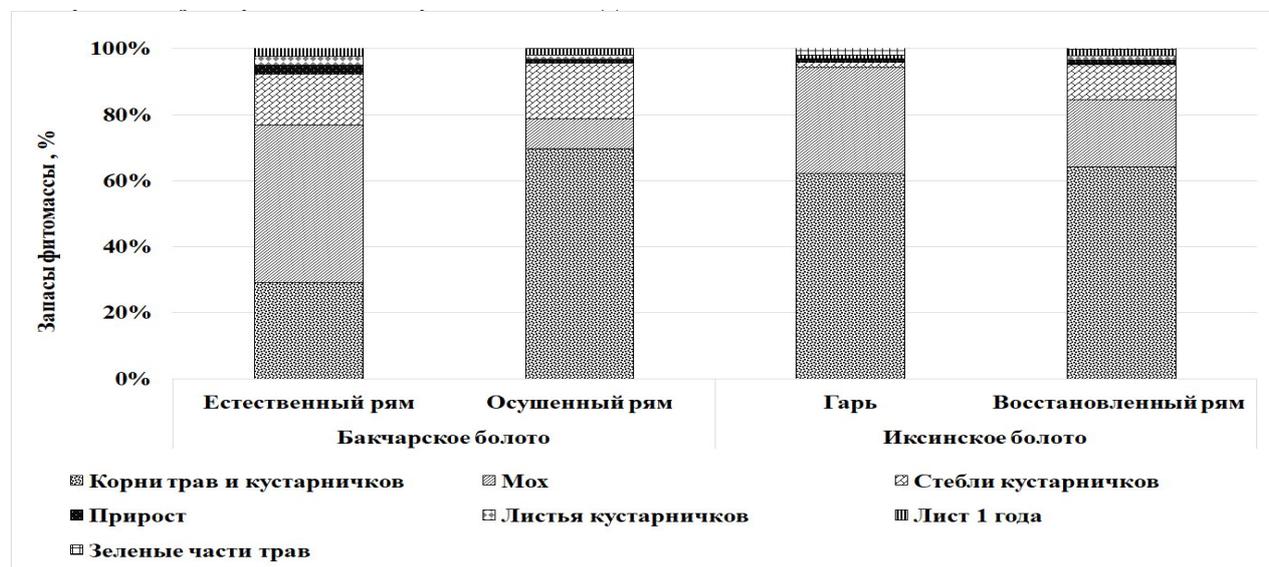


Рисунок 1. Вклад растительных фракций в фитомассу болот «Бакчарское» и «Иксинское»

Сфагновые мхи вносят от 9 до 48% в запасы растительного вещества, при этом максимально в условиях Естественного рьяма, а в условиях Осушенного рьяма наблюдается типичное для осушенных болот угнетение сфагновых мхов (Гаврилов, 2005).

Оценка скорости деструкции *S. fuscum* на начальных этапах разложения показала, что максимальная скорость разложения (в среднем 57% от общих потерь за 4 месяца) во всех фитоценозах происходит в первый месяц деструкции, очевидно при попадании в торфяную залежь

свежего растительного материала происходит всплеск активности микроорганизмов (Добровольская, 2013). Результаты проведенного исследования показали, что в течение 4 месяцев наблюдалась относительно высокая скорость разложения для *S. fuscum* (потери массы составили от 6,9% до 12,5%), в отличие от предыдущих исследований на данной территории (Никонова, Головацкая, 2023), однако выявленная ранее закономерность – замедление деструкции *S. fuscum* не осушенном и постпирогенном участках сохраняется.

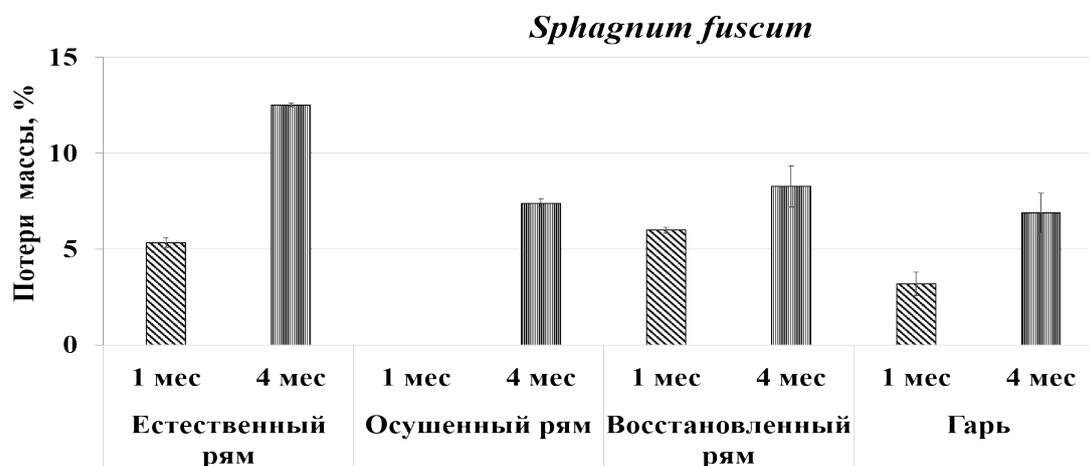


Рисунок 2. Потери массы очеса *Sphagnum fuscum* в торфяной залежи за 1 и 4 месяца, % от исходной массы.

Сфагновые мхи имеют ряд анатомических и морфологических особенностей, так отмершие части сфагнового мха могут длительный период сохранять связь с живой частью, формируя в олиготрофных болотах мощный слой мохового очеса. Граница очеса и живой части мха определяется визуально по изменению цвета сфагновых мхов. Результаты анализа содержания углерода и азота в *S. fuscum* показали, что в среднем содержание углерода в живой части мха несколько ниже (на 1,8 %), по сравнению с очесом (табл.1). Содержание азота в живой части мха на Естественном и Осушенном рьяме выше по сравнению с содержанием азота в моховом очесе (в среднем на 0,3 %), на участке Восстановленного рьяма

на 0,6% ниже, а на Гари содержание азота в живой части мха и моховом очесе не различается (табл.1). В результате процесса разложения происходит вынос углерода, при этом потери углерода в ходе деструкции хорошо коррелируют с потерями массы: максимальные потери углерода как за один месяц, так и за четыре месяца характерны для условий Естественного рьяма, минимальные для Гари. В ходе деструкции сфагновых мхов часто наблюдается иммобилизация азота на начальных этапах (Головацкая, 2017; Головацкая, 2023 Козловская, 1978), при этом в условиях Гари за первый месяц деструкции в 2,4 раза активнее, чем в Естественном рьяме, к 4 месяцам интенсивность накопления азота снижается.

Таблица 1. Содержание общего углерода и общего азота в живой части мхов и очесе, потери элементов в ходе деструкции за 1 и 4 месяца, % от исходного содержания.

Фитоценоз	Запасы фитомассы, содержание элемента %				Потери в ходе деструкции, % от исходного содержания образцов заложенных в торфяную залежь			
	Мох		Очес		1 месяц		4 месяца	
	С,%	N,%	С,%	N,%	С,%	N,%	С,%	N,%
Естественный рям	45,5	0,9	46,8	0,6	10,9	+6,1	11,3	+0,1
Осушенный рям	45,2	1,7	47,6	1,3	-	-	5,9	+0,1
Восстановленный рям	46,4	1,3	46,6	1,9	3,7	0,5	9,6	+0,1
Гарь	44,2	1,7	47,3	1,7	2,1	+14,7	7,9	+0,1

Примечание: знаком «+» отмечено накопление по отношению к исходному содержанию

Заключение. Таким образом, выявлено, что осушение и постпирогенная сукцессия замедляют разложение *S. fuscum* на начальном этапе деструкции. При этом, активная деструкция органического вещества начинается уже в первый месяц разложения, вне зависимости от степени нарушенности болотного фитоценоза.

Потери углерода хорошо коррелируют с потерями массы, наибольшие потери также происходят в первый месяц разложения. На начальных этапах деструкции происходит накопление азота в очесе *S. fuscum*. Максимальное накопление азота наблюдалось в образцах заложенных в условиях Гари в первый месяц деструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной темы: «Развитие системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных и лесных экосистем Западной Сибири», Рег. № 122111400002-2

1. Базанов В.А., Егоров Б.А., Лыготин В.А., Скугарев А.А., 2002, Современная пространственная динамика Большого Васюганского болота (на примере междуречья Икса-Шегарка), Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития, Томск: Институт атмосферной оптики СО РАН, С. 190–196.
2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/> (Дата обращения 4.04.2024).
3. Гаврилов В.Н., 2005, Формирование хвойных древостоев на осушенных болотных почвах лесоводственными методами, Лесопользование и гидрлесомелиорация: материалы Всероссийского симпозиума, Санкт-Петербург, С. 73-85.
4. Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., 2017, Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот, Почвоведение, 5, С. 606–613. DOI:10.7868/80032180X17030030
5. Головацкая Е.А., Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Симонова Г.В., 2023, Изменение изотопного состава азота в процессе трансформации опада растений-торфообразователей на осушенных и постпирогенных участках олиготрофных болот, Почвы и окружающая среда, 6(4), e238. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.238>

6. Добровольская Т.Г., 2013, Функционирование микробных комплексов верховых торфяников – анализ причин медленной деструкции торфа, Москва: Товарищество научных изданий КМК, 131 с.
7. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И., 1978, Динамика органического вещества в процессе торфообразования, Л.: Наука, 176 с.
8. Никонова Л.Г., Калашникова Д.А., Головацкая Е.А., Симонова Г.В., 2023, Деструкция растений-торфообразователей на начальных этапах разложения в условиях ненарушенных и постпирогенных торфяников Западной Сибири, Почвы и окружающая среда, Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию ИПА СО РАН, Новосибирск: ИПА СО РАН, С. 790–794. DOI: <https://doi.org/10.31251/conf1-2023>.
9. Kosykh N.P., Koronatova N.G., Naumova N.B., Titlyanova A.A., 2008, Above- and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems, Wetlands ecology and management, Vol. 16, P. 139–153. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11273-007-9061-7>

РОЛЬ АССОЦИАЦИЙ СФАГНОВЫХ МХОВ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ В АККУМУЛЯЦИИ АЗОТА ЗА ПЕРИОД ФОРМИРОВАНИЯ ПОЙМЕННОГО БОЛОТА (БАССЕЙН Р. СЫСОЛА, РЕСПУБЛИКА КОМИ)

ROLE OF ASSOCIATIONS OF SPHAGNUM MOSSES AND CYANOBACTERIA IN NITROGEN ACCUMULATION DURING THE PERIOD OF FLOODPLAIN BOG FORMATION (SYSOLA RIVER BASIN, KOMI REPUBLIC)

Е.Н. Патова, М.Д. Сивков, Н.Н. Гончарова
E.N. Patova, M.D. Sivkov, N.N. Goncharova

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН (г. Сыктывкар, Россия)
E-mail: patova@ib.komisc.ru

Ассоциации сфагновых мхов с азотфиксирующими цианобактериями играют важную роль в азотном балансе болот высоких и северных широт, а также опосредовано оказывают влияние на накопление углерода и его потоки (Yin et al., 2022). Прогнозируется, что изменения климата приведут к структурной и функциональной перестройке ассоциаций сфагнов с цианобактериями, изменению скоростей накопления N в болотных экосистемах Севера, что, окажет влияние на азотный и углеродный баланс субарктических и бореальных торфяных биомов (Rousk, 2022). В среднетаежной зоне, густо пересеченной речными долинами, широко распространены переходные пойменные болота. Целью работы - оценить роль ассоциаций цианобактерий со сфагновыми мхами в накоплении азота в пойменном болоте, за период его формирования.

Исследования проведены в 2018 г. в таёжной зоне в басс. р. Сысола (61°33' с.ш., 50°46' в.д., Республика Коми) на переходном болоте. Выполнены геоботанические описания, отобраны пробы для определения ботанического состава торфа. Анализ ботанического состава торфа выполнен в лаборатории болотных экосистем Карельского НЦ РАН Н.В. Стойкиной. Определение возраста отложений проведено радиоуглеродным датированием 2 образцов торфа в центре изотопных исследований ИМКЭС СО РАН жидкостно-сцинтилляционным методом с помощью спектрометра-радиометра Quantulus (ТомЦКП СО РАН). Определена масса торфа, выполнен расчет сухой биомассы на площадь 1 м². Содержание общего N и C в торфе выполнено на CHNS-элементном анализаторе EA 1110 (Carlo Erba) в лаборатории Экоаналит ИБ Коми НЦ УрО РАН. Рассчитана скорость накопления N в торфе (Tolonen, Turunen, 1996).

Ранее для данного болота были проведены исследования по изучению растительности, потоков парниковых газов за несколько сезонов (Сивков, Патова, 2018, 2019), выполнена оценка азотфиксирующей активности цианобактерий ассоциированных с двумя видами сфагновых мхов (Патова и др., 2020).

На болоте произрастает 46 видов растений, из них 5 – мохообразные. Развита осоково-сфагновые и осоково-хвощево-сфагновые сообщества. Доминанты мохового яруса - *Sphagnum angustifolium* (ОПП до 80%), в условиях большей обводненности - *S. riparium* (ОПП до 20%). На основании проведенного анализа состава торфа выделено 2 стадии развития болота. I стадия, глубина 240-150 см, травяной низинный торф. В составе торфа доминируют остатки травянистых растений (60-90%), доля споровых в отдельных образцах достигает 35%. Споровые представлены, сфагновыми мхами: *S. riparium* (до 20%), *S. teres* (около 5%), *S. angustifolium* (около 1%). Возраст торфа по данным радиоуглеродного датирования составил 666 ±100 л.н. II стадия, глубина 150-0 см, сфагновый переходный торф. В составе торфа доминируют споровые растения (до 85%), участие травянистых достигает 30%. Основными торфообразователями на этом этапе становятся сфагновые мхи, доминирует *S. riparium* (до 80%). В верхнем 25-см слое торфа возрастает доля кустарничков и олигомезотрофных видов - *S. angustifolium* (с 5 до 45%) и *S. fallax*, что может свидетельствовать о начале перехода болота на олиготрофный этап развития. Формирование растительного покрова на болотном массиве (I ст.), предположительно в середине субатлантического периода Голоцена, началось с зарастания старичного водоема в пойме р. Сысола водными растениями и формированием водных и прибрежноводных кубышково-осковых, рого-

зово-кубышковых палеосообществ сформировавших метровую толщину торфа водного генезиса. На следующем этапе, переход на который произошел в конце субатлантического периода ($\approx 670 \pm 100$ л.н.), сформировалась сфагновая сплавина и водная растительность сменилась болотной. Этот этап характеризуется достаточно высокой скоростью торфонакопления и составляет в среднем 1.65 мм/г. Основу мохового покрова стали составлять *S. riparium* и *S. angustifolium*. На современном этапе развития преобладает *S. angustifolium*. Отмечено снижение содержания общего N в образцах верхних слоев торфа, с доминированием *S. angustifolium*, по сравнению с *S. riparium*. Ранее нами было выявлено, что для ассоциаций цианобактерий со *S. angustifolium* отмечена более низкая фиксация молекулярного азота (Патова и др., 2020), чем у второго

вида. Следовательно, можно предположить, что различия в составе сфагновых мхов оказывают влияние на содержание азота в торфе исследованного болота.

Данные радиоуглеродного анализа показали, что торф в слое 0.85^{-1} м сформировался за период около 670 лет. Сухая биомасса торфа толщиной 1 м составила 59 кг м^{-2} . Среднее содержание N в торфе составило 1.1%, следовательно за 670 лет в торфе накоплено около 0.65 кг N м^{-2} , средняя скорость накопления составила - $0.97 \text{ г N м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Согласно измерениям среднегодовая биологическая фиксация молекулярного азота на экспериментальном болоте составляет 1.5-3.5 г N $\text{м}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Полученные значения азотфиксации для ассоциаций сфагновых мхов с цианобактериями близки к рассчитанной скорости накопления азота в торфе - $0.97 \text{ г N м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

- 1.Патова Е.Н., Сивков М.Д., Гончарова Н.Н., Шубина Т.П. Ассоциации азотфиксирующих цианобактерий со сфагновыми мхами в пойменном болоте средней тайги (Европейский Северо-Восток) // Теор. и прикл. экол. 2020. № 1. С. 117–123.
2. Сивков М.Д., Патова Е.Н. Потоки метана на переходном болоте среднетаежной подзоны Республики Коми: результаты трех лет наблюдений. Известия Коми НЦ УрО РАН. 2018. 3 (35): 34-45.
3. Сивков М.Д., Патова Е.Н. Сезонные потоки метана в пойменном болоте среднетаежной подзоны (северо-восток европейской России). Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. 2019. 4 (211):13-9.
4. Rousk K. Biotic and abiotic controls of nitrogen fixation in cyanobacteria–moss associations. 2022. New Phytologist. 235(4):1330-5.
5. Tolonen., T., Turunen., J. 1996. Accumulation of Carbon in Mires of Finland and Implications for Climatic Change. Holocene 6, 171–178. doi:10.1177/095968369600600204.
6. Yin T., Feng M., Qiu C., Peng S. 2022. Biological Nitrogen Fixation and Nitrogen Accumulation in Peatlands. Front. Earth Sci. 10:670867. doi: 10.3389/feart.2022.670867.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

HYDROLOGICAL REGIME OF OMBROTROPHIC BOGS IN NORTH-WEST RUSSIA CAUSED BY CLIMATE CHANGE

Т.В. Скороспехова, А.Д. Журавлева

T.V. Skorospelkova, A.D. Zhuravleva

ФГБУ «Государственный гидрологический институт» (г. Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: skorospelkova@hydrology.ru

В глобальной климатической системе происходят глубокие изменения с 1950-х годов (IPCC, 2013). Повышение температуры воздуха и сопутствующие изменения цикла влаги в атмосфере, приводят к смене режима увлажнения, изменяется продолжительность и интенсивность влажных и засушливых периодов (Золина и Булыгина, 2016).

Климатические изменения приводят к увеличению температуры воздуха в зимний период, внутригодовому перераспределению осадков, смещению сроков наступления весеннего снеготаяния. Все это оказывает влияние на водный режим верховых болот.

Рубежом смены гидрометеорологического режима болот Северо-Запада России принято считать период 1978-1980 гг. (например, Батуев и Калюжный, 2020), этот период определен в работе (Шикломанов и Георгиевский, 2007). В данном исследовании были применены статистические тесты однородности для определения сроков наступления современного гидроклиматического периода, на примере трех верховых болот северо-запада. На основе полученных временных рядов была проведена оценка изменений во внутригодовом распределении температуры воздуха, осадков, а также уровней болотных вод, как индикатора водного режима болот.

В качестве объектов исследования выбрано три олиготрофных болота: Иласское, Ларьянское и Ламмин-Суо. На этих болотах в рамках специализированной болотной сети были организованы болотные станции Брусовица, Ларьянская и Ламмин-Суо, где с 1950-х годов осуществлялось наблюдение за гидроклиматическими характеристиками по единой программе наблюдений. Станция Ларьянская была закрыта в 2012 году, на станциях Брусовица и Ламмин-Суо наблюдения продолжают.

Болотная станция Брусовица, расположена в Архангельской области на Иласском болотном массиве – типичном представителе олиготро-

фных болот северной тайги. Площадь болота 61 км² (Материалы наблюдений, 1987). Уровни болотных вод измеряются на двух створах, расположенных на грядово-озерковом и грядово-мочажинном микроландшафтах на севере болотно-го массива.

Болотная станция Ларьянская расположена в Тихвинском районе, Ленинградской области на олиготрофном болоте Ларьянское. Площадь болота составляет 118 км², более 75% из которой к настоящему расчищено и осушено для проведения торфоразработок (Материалы наблюдений, 1987). С 2012 года наблюдения на БС прекращены. Для анализа водного режима болота использованы уровни болотных вод, измерявшихся на естественной части болота, не подвергшейся осушению. Измерительный створ располагается на северо-западной части болотного массива, где преобладает грядово-мочажинный микроландшафт, наиболее распространенный на болоте.

Болотная станция Ламмин-Суо расположена в Ленинградской области, в 8 км от г. Зеленогорск. Болото Ламмин-Суо расположено в межкамковом понижении и является типичным представителем олиготрофных болот Карельского перешейка. Площадь болота невелика и составляет 2 км². Для анализа были выбраны скважины болотных вод, расположенные на различных участках болота: куполе, грядово-мочажинном микроландшафте и окрайке болота.

Методы

Первым этапом анализа стало определение однородности по данным среднегодовых температур воздуха, наблюдавшихся на трех болотных станциях. Временные ряды температур проанализированы с использованием теста Буйшанда, теста Петтитта и стандартного теста нормальной однородности (SNHT). Это одни из наиболее широко используемых тестов на однородность для анализа гидроклиматических данных. Согласно нулевой гипотезе предполагается, что значения тестируемой переменной независи-

мы и одинаково нормально распределены. Применение данных статистических тестов позволяет определить период (месяц или год), в котором возможен ступенчатый сдвиг среднего значения (перелом) (Costa et al., 2009).

Второй этап анализа заключался в расчете среднемесячных значений гидроклиматических характеристик (осадков, уровня болотных вод) для определенных на первом этапе однородных периодов каждого из трех болот.

Для каждого из трех болот были определены точки перелома, разделившие ряд наблюдений на два квазистационарных периода. Для болота Иласского точка перелома обнаружена в 2002 году, для болота Ларьянского в 1987 году, для болота Ламмин-Суо в 1986 году (рис.). На каждой из болотных станций в зависимости от времени начала наблюдений за элементами водного режима и доступностью данных за последние годы, были выделены следующие периоды: болото Иласское 1955-2002 и 2003-2018, болото Ларьянское 1971-1987 и 1988-2010, болото Ламмин-Суо 1952-1986 и 1987-2021. Дальнейшее сравнение гидроклиматических характеристик выполнено на основе выделенных периодов.

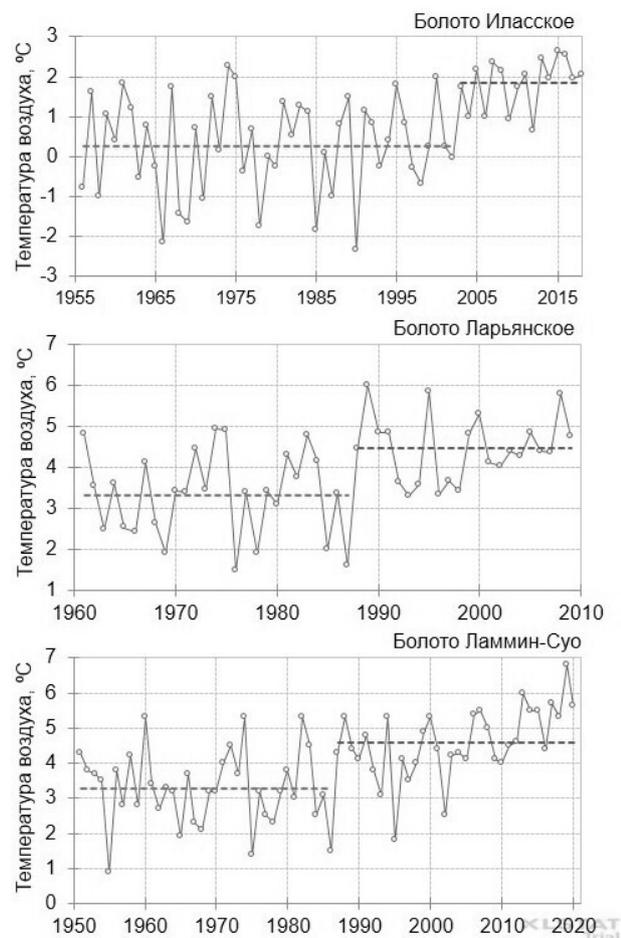


Рисунок. Точка перелома по данным среднегодовой температуры воздуха

Болото Иласское (периоды 1955-2002 и 2003-2018 гг.)

Среднегодовая температура воздуха для выделенных периодов выросла на 1,5°C. Наибольшее потепление произошло в зимний период. Температура воздуха возросла в декабре на 3,6°C, в январе на 1,6°C и в феврале на 1,4°C. Среднегодовое количество осадков возросло на 47 мм, при этом наибольшее увеличение осадков отмечается в июле (+7 мм) и августе (+25 мм). Незначительное уменьшение осадков (не более чем на 5 мм) произошло в феврале, апреле, сентябре и октябре.

Уровни болотных вод на грядово-мочажинном микроландшафте незначительно повысились, среднегодовые значения выросли на 1-2 см. Рост уровня наблюдался с ноября по март, а в период с мая по июль на одной из скважин среднемесячные значения уровней понизились на 2-3 см, на второй скважине уровни не изменились. На грядово-озерковом микроландшафте среднегодовой уровень болотных вод незначительно уменьшился (-1 см), при этом анализ внутригодового распределения показал, что в период с декабря по июль значения снизились на 1-3 см, а в период с августа по ноябрь выросли на 1-2 см.

Анализ данных температуры воздуха на определение периодов однородности показал, что сдвиг среднего значения или так называемый перелом на болотах Ленинградской области (Ламмин-Суо и Ларьянское) наступил значительно раньше в 1987 и 1988 годах. Тогда как на болоте Иласском, расположенном в Архангельской области, точка перелома обнаружена в 2002 г.

Болото Ларьянское (периоды 1971-1987 и 1988-2010 гг.). Среднегодовая температура воздуха за второй период превысила температуру первого на 0,8°C. Наибольшее повышение температуры (на 2,4-2,5°C) произошло в январе и феврале. Снижение среднемесячной температуры отмечено в мае (на 0,2°C) и ноябре (на 1,2°C). Годовое количество осадков увеличилось на 60 мм. При этом наибольшее увеличение произошло в январе-марте, мае и августе и составило от 11 до 15 мм. В сентябре, наоборот, среднее количество осадков снизилось на 15 мм.

Среднегодовой уровень болотных вод на всех скважинах створа в период 1988-2010 снизился на 1-13 см, в зависимости от местоположения скважины. Наибольшее снижение уровня отмечается на скважинах, расположенных в середине створа, на облесенном склоне кольце, и грядово-мочажинном комплексе, в последние годы постепенно переходящим в мохово-лесной микроландшафт. В течении года наибольшее снижение уровня (от 3 до 14 см) для всех скважин наблюдается в апреле, а также в период с июля по сентябрь (от 1 до 11 см). С января по март на сква-

жинах, расположенных в грядово-мочажинном комплексе, отмечается подъем уровня на 1-4 см.

Болото Ламмин-Суо (периоды 1952-1986 и 1987-2021 гг.)

Среднегодовая температура воздуха между двумя периодами повысилась на 1,2°C. Наибольший рост среднемесячной температуры наблюдался в зимний период, с декабря по март температура воздуха возросла от 1,4 до 3,0°C. Годовая сумма осадков в период 1987-2021 гг. выросла на 98 мм, наибольшее увеличение месячных сумм осадков отмечается в январе (+ 16 мм), феврале (+23 мм) и августе (+17 мм). Снижение осадков зафиксировано в апреле (- 3 мм) и сентябре (- 8 мм).

Уровни болотных вод изменялись неоднородно, в зависимости от места расположения скважин. На куполе болота повышение уровня отмечено как для среднегодового значения (+7 см), так и для каждого месяца в отдельности. Наибольшее повышение отмечается в феврале (+ 10 см) и марте (+ 14 см). На грядово-мочажинном комплексе среднегодовое значение уменьшилось на 1 см, в период с июня по сентябрь уровень вырос на 1-4 см, наибольшее снижение (- 5 см) произошло в апреле. На окрайках болота уровни болотных вод снизились как по среднегодовому значению на 4-9 см, так и для каждого месяца в отдельности. На окрайках болота внутригодовое распределение динамики уровня имело крайне неравномерный характер. В целом можно сказать, что для летнего периода снижение

уровней происходило менее активно и составило от 3 до 11 см. В остальное время уровень понижился на 8-16 см.

Для трех болот отмечается рост температуры воздуха, особенно в зимний период и увеличение атмосферных осадков. Однако в зависимости от месторасположения болота, а также местоположения на самом болоте изменение внутригодового режима уровней болотных вод происходит по-разному.

На болоте Иласском, расположенном значительно севернее, наблюдались сравнительно небольшие изменения водного режима. На грядово-озерковом микроландшафте большую часть года уровней болотных вод отмечается небольшой рост, за исключением периода с мая по июль, когда уровень снижался. Что интересно, в этот же период года зафиксировано наибольшее увеличение среднемесячных сумм атмосферных осадков. На грядово-мочажинном микроландшафте понижение уровня болотных вод отмечено для более длительного периода (с декабря по июль), в остальные месяцы уровень повысился не более чем на 2 см по сравнению с периодом 1985-2002 гг.

На болоте Ларьянском с января по март наблюдался наибольший рост уровней болотных вод, в это же время значительно увеличились атмосферные осадки. В апреле зафиксировано снижение уровней болотных вод, которые так и оставались пониженными до конца года, по сравнению с уровнями в период до 1988 года.

1. Батуев В. И., Калужный И. Л. Анализ факторов, определяющих многолетнее изменение стока с олиготрофных болот // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – №. 6. – С. 28-46.
2. Золина О. Г., Булыгина О. Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – Т. 1. – С. 84-103.
3. Материалы наблюдений болотных станций за 1985 г.: Вып. 1. Санкт-Петербург, 1987. 548 с.
4. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата. СПб, 2007. С. 2017:14
5. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
6. Costa A.C., Soares A. Homogenization of Climate Data: Review and New Perspectives Using Geostatistics. Math Geosci 41, 291–305 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11004-008-9203-3>.

ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ТАРМАНСКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА

STOCKS OF SOIL CARBON IN THE DISTURBED ECOSYSTEMS OF THE TARMANSKOYE FEN

Е.А. Солдатова^{1,2}, А.О. Константинов¹, А.О. Курасова¹

Е.А. Soldatova^{1,2}, А.О. Konstantinov¹, А.О. Kurasova¹

¹ Тюменский государственный университет (г. Тюмень, Россия)

² Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Московская область, Россия)

E-mail: 2a61@mail.ru

Болотные ландшафты Западной Сибири играют ключевую роль в формировании континентальных биогеохимических циклов. Данный тип экосистем, с одной стороны, может выступать как важнейший естественный резервуар секвестрации углерода, так и как потенциальный источник эмиссии климатически активных газов. Реализация потенциала болотных массивов зависит от целого ряда факторов, включающих состояние растительного и почвенного покрова, степень гидроморфизма, частота пирогенных событий, а также интенсивность и характер антропогенного воздействия. Последний параметр является одним из наиболее важных, поскольку способен как напрямую, так и опосредованно влиять на все остальные.

Наиболее высокая интенсивность антропогенного воздействия и, соответственно, наиболее выраженный характер трансформации отмечаются для подтаежных болот Западной Сибири, что вполне логично, поскольку данная территория является одной из наиболее освоенных и заселенных в пределах региона. Примером подобной в значительной степени нарушенной и преобразованной экосистемы является Тарманский болотный массив на юге Тюменской области.

Тарманский болотный массив, занимает площадь 1240 км² (Калинин, Чиков, 2002) и находится в непосредственной близости от агломерации г. Тюмени. Как и ряд других низинных болот юга Тюменской области, данный болотный массив подвергся масштабной осушительной мелиорации в 50-60-е годы прошлого века (Ануфриева и др., 2001). Мелиоративные мероприятия обусловили сегментацию его территории, за счет организации сети дренажных каналов и дамб. В дальнейшем, осушенные участки и выработанные торфоразработки использовались как сено-

косные угодья, пашни и пригородные селитебные зоны.

С развитием рынка углеродных единиц осушенные болота стали рассматриваться как полигоны для реализации климатических проектов (Шахматов и др., 2024). В этой связи представляется важным определить направленность потоков углерода в подобной системе при возможных сценариях землепользования, включая вторичное обводнение торфяных почв (Günther et al., 2020; Martens et al., 2021; Sirin et al., 2021) и использование в сельскохозяйственной деятельности (Ильясов и др., 2020, Молчанов и др., 2020), а также оценить сопутствующее изменение запасов углерода (Вомперский и др., 2021). При этом стоит отметить, что роль неорганического углерода в структуре пулов почвенного углерода в целом изучена недостаточно хорошо, по сравнению с органическим (Zamanian et al., 2016; Shi et al., 2019; Raza et al., 2024). Целью данного исследования было оценить запасы углерода в почвах различных участков Тарманского болотного массива, включая пулы почвенного органического ($C_{орг}$) и неорганического углерода ($C_{неорг}$).

В качестве объекта исследования выбраны участки южной, периферийной части Тарманского болотного массива (рис. 1). Почвенные разрезы закладывались в пределах участков, характеризующихся различной интенсивностью и характером антропогенной нагрузки. Почвы выбранных участков определены как агроторфяно-глееземы минерально-торфяные (участок I), агроторфяно-глееземы окисленно-глеевые и агродерново-элювиземы глеевые орудинелые (участок II), агроземы торфяно-минеральные окисленно-глеевые (участок III), торфяные эвтрофные типичные (участки IV и V).

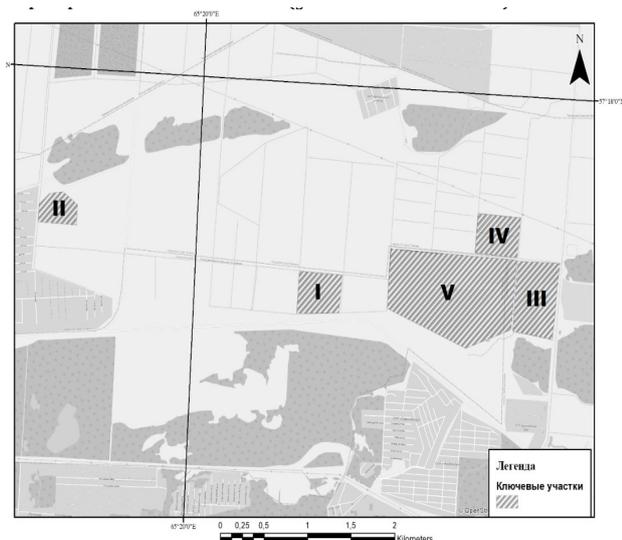


Рисунок 1. Карта-схема расположения исследуемых участков

Содержание углерода определялось методом высокотемпературного каталитического окисления (Vario PYRO Cube, Elementar, UK). Содержание $C_{\text{неорг}}$ определялось по разнице между общим содержанием почвенного углерода и содержанием $C_{\text{орг}}$, определенном после удаления карбонатов концентрированной соляной кислотой методом фумигации (Komada et al., 2008, Ramnagire et al., 2011). Данный метод является надежным методом определения органического углерода в карбонатсодержащих почвах, который эффективно разделяет $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{неорг}}$ без изменения содержания органического вещества (Walther et al., 2010). В тоже время следует отметить, что рассматриваемые почвы характеризуются сложным карбонатным профилем и специфическим составом карбонатов, что может потребовать корректировки оценок пулов $C_{\text{орг}}$ и $C_{\text{неорг}}$ с учетом минералогического состава, потенциально способного влиять на эффективность метода фумигации для ряда горизонтов.

Запасы углерода рассчитывались по следующей формуле:

$$X_{\text{stock}} = X \times \rho \times H \times 10 \quad (1)$$

где X_{stock} – запасы $C_{\text{орг}}$ / $C_{\text{неорг}}$ в почве ($\text{кг}/\text{м}^2$); X – содержание $C_{\text{орг}}$ / $C_{\text{неорг}}$ в почве ($\text{г}/100 \text{ г}$ почвы); ρ – плотность почвы ($\text{г}/\text{см}^3$); H – мощность горизонта (см). Если содержание C было определено в нескольких интервалах горизонта, для которого определялась плотность сложения, содержания усреднялись.

На слабонарушенных участках IV и V основные запасы $C_{\text{орг}}$ сосредоточены в нижней части разрезов (глубже 30 см), в то время как в пределах сильно нарушенных участков до 80% и более запасов $C_{\text{орг}}$ сосредоточено в верхних 30 см почвы (рис. 2). Учитывая высокую неод-

нородность почв даже внутри одного чека, есть исключения из данного тренда. Например, для разрезов ТБМ-11 и ТБМ-12 в пределах участка лесомелиорации (IV), отмечается, что 70% и 80% запасов $C_{\text{орг}}$ сосредоточены в интервале глубин 0-30 см. В то время как в разрезах ТБМ-1 и ТБМ-3 запасы $C_{\text{орг}}$ распределяются достаточно равномерно по профилю и в верхних горизонтах почвы сосредоточено 51 и 59% запасов $C_{\text{орг}}$, соответственно. Данный факт хорошо согласуется с морфологическим обликом почв, когда за счет формирования агроторфяного горизонта наблюдается модификация органогенного профиля. Таким образом, перераспределение запасов $C_{\text{орг}}$ между верхним и нижними горизонтами почвы отражает, в первую очередь, степень нарушенности почвенного покрова участков. Наименее нарушенные участки (IV – лесомелиорации, V – изолированное слабонарушенное осушенное болото) характеризуются более высокой степенью

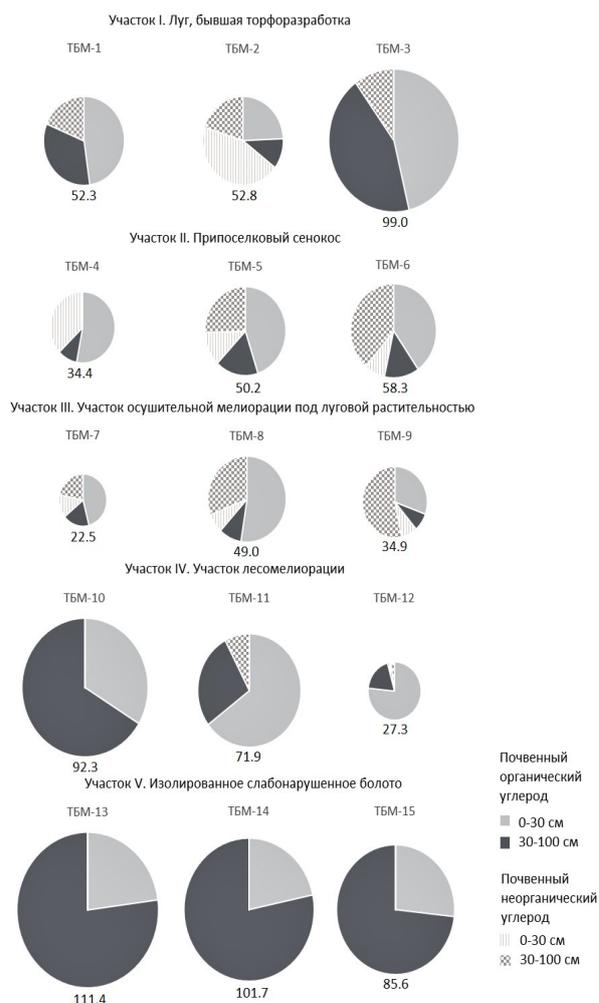


Рисунок 2. Соотношение запасов органического и неорганического углерода на участках Тарманского болотного массива. Числа под круговыми диаграммами – общие запасы почвенного углерода до глубины 100 см (в $\text{кг}/\text{м}^2$)

гидроморфизма и значительно большей мощностью торфяной залежи, однако отдельные разрезы, расположенные на периферии участков или подвергшиеся более интенсивному антропогенному воздействию, характеризуются выраженным уменьшением запасов $C_{орг}$ с глубиной.

Пул $C_{неорг}$ более выражен для почв сильно нарушенных участков, составляя в некоторых разрезах более 50% от общих запасов углерода (рис. 2). Наименьший вклад пула $C_{неорг}$ в пределах сильно нарушенных участков отмечается в разрезах ТБМ-1 и ТБМ-3 (участок торфоразработки) и составляет 19% и 10%, соответственно. Вклад $C_{неорг}$ в общие запасы почвенного углерода для разрезов ТБМ-11 и ТБМ-12 (участок лесомелиорации) в пределах слаборазрушенных участков составляет 7.8% и 4.3%, соответственно. В основном пул $C_{неорг}$ приурочен к нижним почвенным горизонтам (глубже 30 м), однако встречаются разрезы, где основные запасы $C_{неорг}$ сосредоточены в верхних горизонтах (ТБМ-2, ТБМ-4), что, по всей видимости, обусловлено внесением карбонатсодержащих материалов

при попытках рекультивации или дальнейшем использовании в качестве сельскохозяйственных земель.

В целом, запасы почвенного углерода в пределах слаборазрушенных участков больше, чем в пределах сильно нарушенных (исключение составляют разрезы ТБМ-12 с низкими запасами почвенного углерода и ТБМ-3 с высокими запасами углерода). В среднем, запасы углерода (суммарно, $C_{орг}$ и $C_{неорг}$) до глубины 100 см в пределах сильно нарушенных участков составляют 50.4 кг/м², в пределах слаборазрушенных участков – 81.7 кг/м². При этом для слаборазрушенных участков запасы углерода практически полностью представлены пулом $C_{орг}$, а в пределах сильно нарушенных участков значительную роль играет пул $C_{неорг}$.

Таким образом, изменение запасов углерода в изученных почвах и соотношение пулов $C_{орг}$ и $C_{неорг}$ отражают степень антропогенной нагрузки и гидроморфизма участков. С увеличением степени нарушенности возрастает роль пула $C_{неорг}$ и снижаются запасы $C_{орг}$.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 23-77-10012.

1. Ануфриева Л.И., Шиверских И.А., Кривенкова Г.Г. Эколого-геологическое картографирование масштаба 1:200 000 территории листов О-41-XXIV, XXX. Отчет Восточной съемочной эколого-геологической партии за 1993-2001 г.г.: геологический отчет. Тюмень, 2001. – 1541 л.
2. Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Валяева Н.А. Влияние поверхностного осушения на запас органического вещества в почвах заболоченных лесов южно-таежной зоны европейской части России / Материалы научно-практической конференции «Проблемы и состояние почв городских и лесных экосистем». - Издательство: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. – С. 43-46.
3. Ильясов Д.В., Молчанов А.Г., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Сирин А.А. Моделирование нетто-экосистемного обмена диоксида углерода сенокоса на осушенной торфяной почве: анализ сценариев использования // Компьютерные исследования и моделирование. – 2020. – Т.12. – № 6. – С. 1427-1449.
4. Калинин В.М., Чиков В. Количественная оценка воздействия мелиорации земель на режим и качество подземных вод // Вестник Тюменского государственного университета. – 2002. – № 3. – С. 134-140.
5. Молчанов А.Г., Суворов Г.Г., Ильясов Д.В., Сирин А.А. Потоки диоксида углерода при разном режиме использования сенокоса на осушенной торфяной почве // Агрехимия. – 2020. – № 9. – С. 48-64.
6. Шахматов К.Л. и др. Вторичное обводнение осушенных торфяников умеренного пояса. Методология реализации климатического проекта № 0016. – Разработчик: Институт глобально климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, 2024. – 66 с.
7. Günther A., et al. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11. – 1644.
8. Komada T., Anderson M.R., Dorfmeier C.L. Carbonate removal from coastal sediments for the determination of organic carbon and its isotopic signatures, $\delta^{13}C$ and C: comparison of fumigation and direct acidification by hydrochloric acid // Limnology and Oceanography: Methods. – 2008. – Vol. 6. – Pp. 254–262.
9. Martens M. et al. The greenhouse gas emission effects of rewetting drained peatlands and growing wetland plants for biogas fuel production // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 277. – 111391.
10. Ramnarine R. et al. Carbonate removal by acid fumigation for measuring the $\delta^{13}C$ of soil organic carbon // Canadian Journal of Soil Sciences. – 2011. – Vol. 91. – Pp. 247-250.
11. Raza S. et al. Inorganic carbon is overlooked in global soil carbon research: A bibliometric analysis // Geoderma. – 2024. – Vol. 443. – 116831.
12. Shi, L. et al. The effects of nitrogen addition on dissolved carbon in boreal forest soils of northeastern China // Science Reports. – 2019. – Vol. 9. – 8274.

13. Sirin A. et al. Addressing peatland rewetting in Russian Federation climate reporting // *Land*. – 2021. – Vol. 10. – 1200.
14. Walthert, L., Graf, U., Kammer, A., Luster, J., Pezzotta, D., Zimmermann, S. and Hagedorn, F. (2010), Determination of organic and inorganic carbon, $\delta^{13}C$, and nitrogen in soils containing carbonates after acid fumigation with HCl. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 173: 207-216. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900158>
15. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Ya. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes // *Earth-Science Reviews*. – 2016. – Vol. 157. – Pp. 1–17.

**РАЗНОГОДИЧНАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ БОЛОТНЫХ ВОД
НА УЧАСТКЕ СОЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЕРХОВОГО БОЛОТА
(ВОСТОЧНО-СУРГУТСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ НЕФТИ, СУРГУТСКАЯ НИЗИНА)**

**MULTI-YEAR ELECTROCONDUCTIVITY DYNAMICS OF MIRE WATER
AT SALT POLLUTION OF THE RAISED BOG
(VOSTOCHNO-SURGUTSKOYE OIL FIELD, SURGUT LOWLAND)**

В.Н. Тюрин, В.А. Харбака, О.В. Масловская
V.N. Tyurin, V.A. Kharbaka, O.V. Maslovskaya*

Сургутский государственный университет (Сургут, Россия)
*E-mail: tyurin_vn@mail.ru

Введение. В данном сообщении представлены некоторые результаты мониторинга верхового болота на Восточно-Сургутском месторождении нефти (участок 1), пострадавшего от воздействия подтоварных высокоминерализованных вод, где с 2007 г. проводятся наблюдения за состоянием растительности и экологическими параметрами [3]. Основное внимание уделено динамике солевого загрязнения через показатель электропроводности.

Объекты и методы исследования. Исследуемый участок, подвергнутый в 2005 г. солевому загрязнению, находится в 15 км северо-восточнее Сургута. На нем в 2007 г. были заложены две пробные площадки (ПП) – ПП 1 и ПП 2 для оценки восстановительной динамики растительного покрова и изменения во времени параметров среды. В 2010 г. исследования расширены (ПП 6Ф, 7, 8, 13, 14, 15). Позднее ПП 13 и ПП 14 были ликвидированы при строительстве карьера. Еще две площадки в сосново-кустарничково-сфагновом болотном биоценозе (ПП 21 и ПП 22) заложены в 2015 г. вблизи коридора трубопроводов (западнее места аварии). К востоку, в сторону понижения, площадки на месте кустарничково-сфагнового болота размещены по мере удаления от источника загрязнения соответственно: ПП 15, 8, 7, 1, 2, 6Ф.

Замеры параметров (рН, электропроводность, уровень болотных вод) и отбор проб болотных вод и почв на ПП проводились в 2007, 2010, 2014-2019 и 2023 гг., на ПП 21 и 22 – с 2015 г. (табл.). В лабораториях СурГУ определялись: концентрация хлоридов (в отдельные годы также ионный состав болотных вод), влажность почв, их зольность, некоторые другие показатели.

В данной работе основное внимание уделено электропроводности, позволяющей оперативно оценивать техногенное засоление с помощью кондуктометра. Данный метод широко использу-

ется при выявлении загрязнения природной среды, в том числе на нефтяных месторождениях Западной Сибири [1, 2].

Результаты и обсуждение. На исследуемом участке, подвергнутом в 2005 г. воздействию подтоварных вод, произошла гибель олиготрофной растительности, с последующим замещением типичных видов верховых болот эвтрофными и мезотрофными растениями. Они сохранили свое заметное присутствие в течение всего периода наблюдения, указывая на изменение условий произрастания, вызванных загрязнением (рост значений рН, эвтрофикация и пр.).

В первый год наблюдения (2007 г.) на загрязненном участке зафиксированы высокие значения электропроводности (595-645 мкСм/см). Однако уже в 2010 г. наблюдалось ее снижение почти на порядок, отражая интенсивное самоочищение болотного массива; электропроводность оказались близка к фоновым значениям, характерным для ПП 6Ф (менее 100 мкСм/см), а концентрация хлоридов не превышала 30 мг/л. Таким образом, наблюдение показало преимущественное вымывание загрязнителя в течение пяти лет после аварии.

В 2014-2015 гг. произошел рост электропроводности, который, по нашему мнению, явился следствием очередной аварии на водоводе, хотя не столь существенной как в 2005 г. Подтверждением этому служит распределение значений показателя в пространстве: в 2014 г. и 2015 г. максимум находился вблизи источника загрязнения, в последующие годы значения распределялись более равномерно.

В 2019 г. электропроводность на ПП 2, 1, 7, 8, 15 достигла фоновых значений. Вблизи источника загрязнения (ПП 21 и ПП 22) сохранилось заметное превышение показателя над фоном, однако оно не превышало двух крат.

Таблица. Электропроводность на пробных площадках (ПП) по годам, мкСм/см

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

Сокращения: Ф – фоновая (ПП 6Ф), З – загрязненные на месте выноса загрязнителя в сторону понижения (ПП 2, 1, 7, 8, 15), И – у источника загрязнения (ПП 21, 22), н/д - нет данных. Примечание: * в 2010 и 2014 гг. замеры электропроводности не проводились; расчет их выполнен по отношению к концентрации хлоридов в соответствии с полученными данными на обследуемом участке за 2015-2023 гг.

В 2023 г. зафиксировано очередное повышение электропроводности на участке. Вероятное загрязнение произошло между 2019 г. и 2023 г. Вместе с тем, 2023 г. был аномально сухим (уровень болотных вод был низким), что обусловило рост показателя по естественным причинам (при уменьшении обводнённости электропроводность возрастает).

Выводы. 1. На участке за 20-летний период наблюдений зафиксировано неоднократное изменение электропроводности в сторону ее уве-

личения (2007, 2014, 2023 гг.), что указывает на периодическое попадание поллютанта в окружающую среду.

2. Данные по электропроводности показывают преимущественно вымывание загрязнителя в течение пяти лет.

3. При снижении электропроводности до фоновых значений восстановление растительности до исходного состояния не происходит из-за изменения экологических условий при загрязнении.

Авторы благодарят Г.М. Кукуричкина, Ю.Н. Гуменюк и Т.А. Бейгишиеву за содействие в организации мониторинга и сбор данных в 2010, 2014 и 2015 гг. Также выражаем благодарность за совместную работу студентам: О.А. Воробьевой, А.О. Коху, Т.Р. Мельнику и А.С. Петрякину.

1. Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Миляева Е.В. Самоочищение засоленного торфяника по данным кондуктометрических съемок // Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Третьего Международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 27 июня – 5 июля 2011). Новосибирск, 2011. С. 168-170.
2. Тюрин В.Н., Баховская О.Ю., Баховская М.Ю., Домахина В.А., Кох А.О., Масловская О.В. Особенности пространственной оценки солевого загрязнения с использованием кондуктометра (на примере верхового болота Сургутской низины) // Природопользование и охрана природы: Охрана памятников природы, биологического и ландшафтного разнообразия Томского Приобья и других регионов России. Материалы IX Всероссийской с международным участием научно-практической конференции (Томск, 21-23 апреля 2020 г.). Томск: ТГУ, 2020. С. 237-241.
3. Тюрин В.Н., Кукуричкин Г.М. Некоторые особенности зарастания солевых загрязнений на болотах Сургутской низины // Западносибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Третьего Международного полевого симпозиума (Ханты-Мансийск, 27 июня – 5 июля 2011). Новосибирск, 2011. С. 204-205.

ОЦЕНКА ТРАНСФОРМАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПИРОГЕННОГО ФАКТОРА

ASSESSMENT OF WATER CHEMISTRY TRANSFORMATION OF WESTERN SIBERIAN PEATLANDS UNDER THE INFLUENCE OF PYROGENIC FACTOR

*Ю.А. Харанжевская, А.А. Синюткина
Yu.A. Kharanzhevskaya, A.A. Sinyutkina*

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа - филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (г. Томск, Россия)
e-mail: kharan@yandex.ru

Изменения климата увеличивают продолжительность и тяжесть пожароопасного периода, поэтому болота становятся более уязвимы для природных пожаров, увеличивается их частота и интенсивность, что является весьма актуальной проблемой. Пожары оказывают существенное влияние на химический состав природных вод, а закономерности их постпирогенного изменения зависят от интенсивности пожара и, как правило, носят пульсационный характер (Ackley et al., 2021; Kharanzhevskaya, Sinyutkina, 2021). Целью данной работы является исследование химического состава вод постпирогенных участков болот в лесотундровой и таежной зонах Западной Сибири, анализ условий формирования и закономерностей пространственной-временной динамики в зависимости от степени выгорания поверхности.

Исследования проводились в пределах 3 ключевых участков пирогенных болот (Бакчарское болото Васюганское болото, Усть-Бакчарское болото и плоскобугристое болото в районе с. Пангоды), расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири, выгоревших в 2014-2016 гг. Отбор проб болотных вод производился в июле–августе 2022-2023 г. из скважин в торфе, организованных непосредственно перед отбором проб. В пределах каждого ключевого участка отбор проб производился на серии площадок 5×5 м с разной степенью выгорания поверхности, а фоновые участки выбирались за пределами контура пожара. Всего на Васюганском болоте было организовано 6 пирогенных площадок (BF1, BF2, BF3, BF4, BF5, BF6) и 2 фоновые (RG, B252), на Усть-Бакчарском отбор проб производился на 2 пирогенных участках (UBF1, UBF2) и 1 фоновой площадке (Uбфон), на плоскобугристом болоте также отбор проб был выполнен на 2 пирогенных участках (PF1, PF2) и 1 фоновой площадке (Рфон). Определение химического состава болотных вод проводилось

с использованием аттестованных методик в Лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа-филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН и в Химико-аналитическом центре «Плазма». В полевых условиях при отборе проб в водах сразу определялись pH, ОВП, CO₂, O₂ и температура вод.

Анализируя данные за 2023 год по Васюганскому болоту можно отметить, что под влиянием пирогенного фактора в болотных водах отмечается повышение в 1,04-3 раза концентраций Ca²⁺, Mg₂⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, Fe_{общ}, SO₄²⁻, Cl⁻, Cu, Zn, Cd, Pb, P, Mn, C_{орг}, ХПК. Статистический анализ показал значимое различие в химическом составе вод в сравнении с фоном по непараметрическому критерию Уилкоксона по площадкам BF1 (Z=2,80, p=0,005), BF2 (Z=3,06, p=0,002), BF3 (Z=2,45, p=0,025). Анализ данных за 2 года исследований показал снижение pH и содержания HCO₃⁻, Zn в болотных водах и преимущественно увеличение остальных компонентов в 2023 году, как следствие более низких уровней болотных вод, в сравнении с 2022 годом, как на пирогенных участках, так и на фоновых участках (рисунок 1-2).

Данные за 2023 год по Усть-Бакчарскому болоту показали, что в условиях пирогенного фактора в пробах в среднем в 1,4 раза увеличивается содержание Ca²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, HCO₃⁻, Fe_{общ}, Cl⁻, ХПК, Cu, Zn, Cd, Pb, P, Mn. Достоверные различия в химическом составе с фоновой площадкой по критерию Манна-Уитни отмечаются только на площадке UBF2 (Z=3,20, p=0,0013). Сопоставляя данные за 2 года можно отметить снижение концентраций HCO₃⁻, CO₂, P, Cd, Pb в водах в 2023 году на площадке UBF1 и NH₄⁺, Fe_{общ}, Zn в водах на площадке UBF2 и повышение всех остальных соединений.

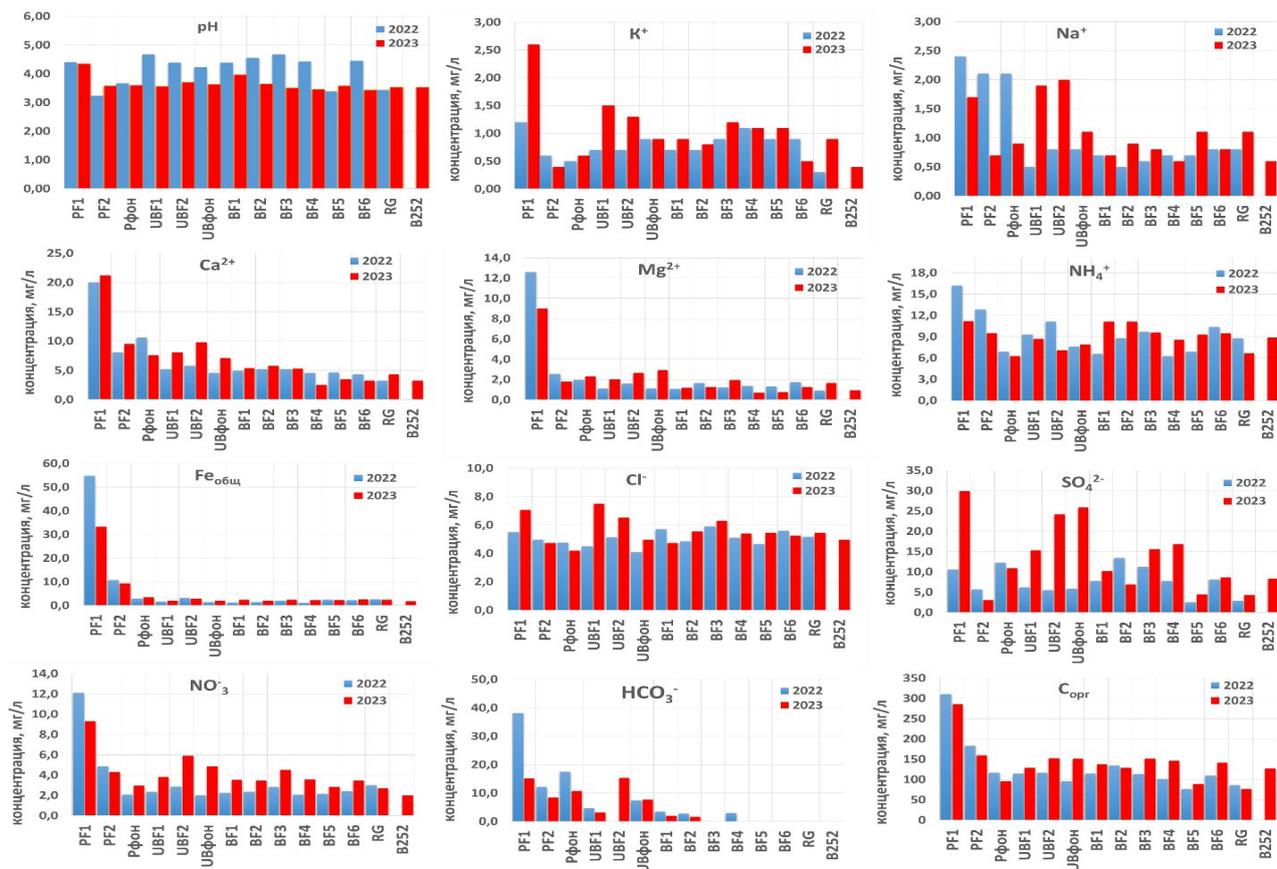


Рисунок 1. Изменение химического состава вод пирогенных участков Васюганского, Усть-Бакчарского и плоскобугристого болота у с. Пангоды в 2022 -2023 гг.

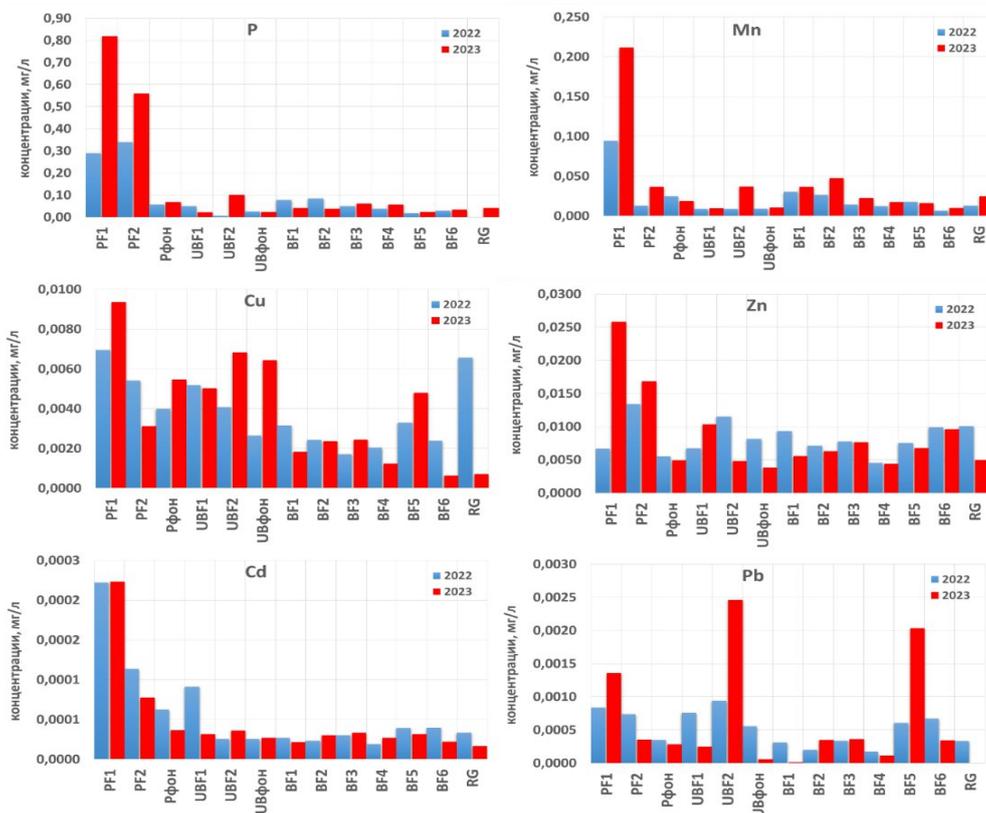


Рисунок 2. Изменение химического состава вод пирогенных участков Бакчарского, Усть-Бакчарского и плоскобугристого болота у с. Пангоды в 2022-2023 гг.

Анализ данных по плоскобугристому болоту у с. Пангоды показал преимущественно снижение содержания химических веществ в болотных водах в 2023 году в сравнении с 2022 годом, а рост концентраций отмечен только по некоторым показателям. Так на площадке PF1 в 2023 году отмечается повышение концентраций Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , ХПК, Cu , Zn , Cd , Pb , P , Mn , тогда как на площадке PF2 отмечен рост содержания Ca^{2+} , CO_2 , P , Mn , Zn . Фоновая площадка характеризуется повышением концентраций K^+ , Mg^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, NO_3^- , ХПК, CO_2 .

Кластерный анализ показал значимые различия в химическом составе в целом и разделил на 2 кластера пробы, отобранные в 2022 и 2023 годах. В первый кластер вошли все пробы, отобранные на пирогенных участках Бакчарского болота в 2023 году, а также на фоновых участках 2022-2023 гг. Во второй кластер вошли все пробы за 2022 год и проба с площадки BF5 за 2023 год.

Таким образом, исследования в 2023 году подтвердили выводы, сделанные ранее, что под влиянием пирогенного фактора в болотных водах повышается содержание Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NO_3^- , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , Cu , Zn , Cd , Pb , P , Mn , $\text{C}_{\text{орг}}$, CO_2 , более значимое повышение концентраций отмечается на участках болот с большей мощностью горелого слоя, которое было отмечено

на плоскобугристом болоте в Пангодах. В 2023 году в сравнении с 2022 годом в условиях более низкого уровня болотных вод и большей суммы активных температур отмечается рост концентраций практически всех показателей химического состава вод. Повышение концентраций веществ в 2023 году относительно 2022 года отмечается как на пирогенных участках, так и на фоновых. Данные за 2023 год показали, что отмечается закономерное повышение концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NO_3^- , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , Cu , Zn , Cd , P , $\text{C}_{\text{орг}}$, CO_2 в водах болот с юга на север, а Eh , O_2 , температура снижается в ряду Васюганское болото-Усть-Бакчарское болото-Пангоды. Статистический анализ с применением непараметрического критерия Уилкоксона показал достоверные различия в составе вод площадки PF1 в Пангодах со всеми площадками Васюганского и Усть-Бакчарского болот. При этом фоновые площадки не показали достоверных различий в химическом составе, однако можно отметить более высокие концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Cu , Cd , Pb в пробах с Усть-Бакчарского болота и плоскобугристого болота у с. Пангоды в сравнении с Васюганским болотом, что определяется процессами минерализации органических веществ в торфяной залежи на Усть-Бакчарском болоте и малой мощностью торфяной залежи в Пангодах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

1. Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quinton W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost. *Science of the Total Environment*, 2021, Volume 782, 15 August, 146841 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841
2. Kharanzhevskaya Yu.A., Sinyutkina A.A. Effects of wildfire on the water chemistry of the northeastern part of the Great Vasyugan Mire (Western Siberia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 928, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/928/1/012006

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА (МУХРИНО, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

SPATIAL SEASONAL DYNAMICS OF DISSOLVED ORGANIC CARBON (MUKHRINO, WESTERN SIBERIA)

В.С. Шанёва
V.S. Shanyova

Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)
e-mail: SHANYOVA.VIKA@MAIL.RU

Введение. Мониторинг болотных экосистем необходим для выявления их реакции на воздействие климатических и антропогенных факторов. Долгосрочный мониторинг позволяет обнаружить текущие изменения в функционировании болотных экосистем, биоразнообразия, эмиссии парниковых газов и гидрологических характеристик, а также определить степень влияния внешних факторов (климат, гидрология) на эти процессы (Olefeldt D., 2012).

Водно-болотные угодья, как правило, являются границей раздела между наземными и водными экосистемами (McLaughlin J. W., 1994). Во время разложения в условиях затопления часть подстилки и торфа переходит в растворенную форму, которая может проходить через фильтр толщиной 0,45 мкм, известный как растворенный органический углерод (РОУ), но также распространены поры фильтра размером 0,2–0,7 мкм (Zarov E., 2012).

Торфяники в субарктическом регионе часто представляют собой комплекс из нескольких раз-

личных типов ландшафтов, которые отличаются условиями вечной мерзлоты, гидрологическими условиями и составом растительности. Химический состав и концентрация РОУ различается на экосистемах и в разной степени оказывает влияние на арктические реки (Katheryn Burd, 2020).

Актуальность. Потоки растворенного органического углерода (РОУ) из экосистемы могут быть важным компонентом углеродного баланса в водно-болотных угодьях (Kolka R., 2013). Особую важность приобретают региональные исследования химического состава болотных вод, которые призваны обеспечить оценку экологического состояния заболоченных территорий и понимания, как изменяется со временем и в пространстве концентрация и свойства РОУ.

Объекты и методы. Полевые измерения проводились на полевой станции Мухрино, которая расположена в среднетаежной зоне Западной Сибири, в 30 км от города Ханты-Мансийска.

Пробоотбор производился на четырех точках микрорельефа грядово-мочажинного комплек-

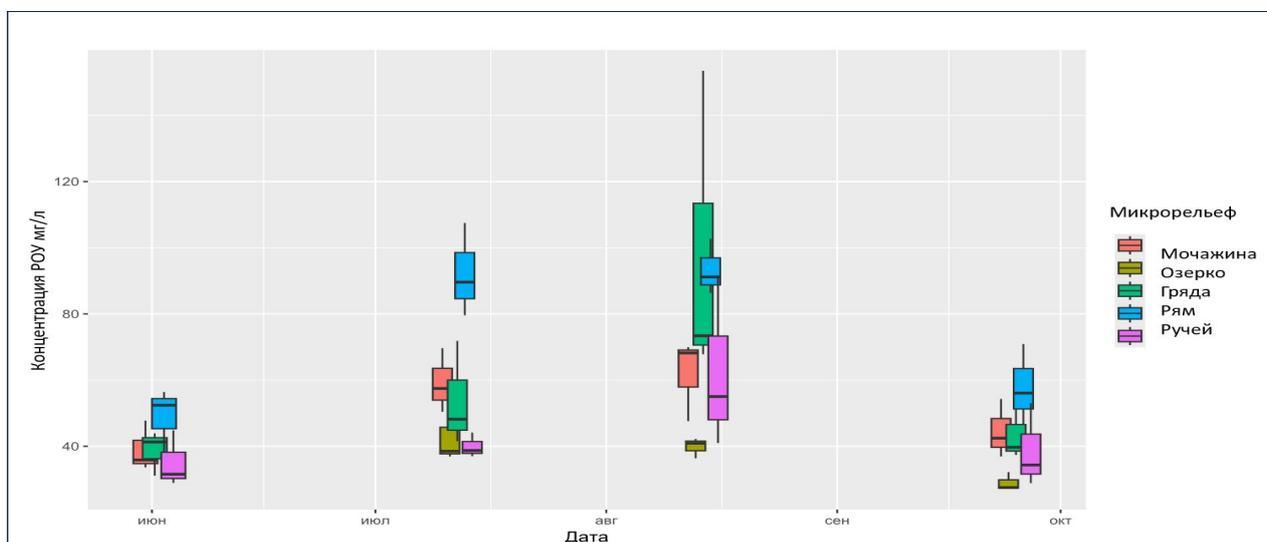


График 1. Сезонная динамика РОУ за 2021г.

са, который является классическим примером комплексности болотных экосистем. Деятельный горизонт, в котором производился пробоотбор обычно составляет 0-50 см, он характеризуется сезонным изменением уровней болот. При этом ключевым фактором, определяющим характеристики потока растворенного органического вещества (РОВ), является глубина сезонно-талого слоя, что связано с увеличением времени его удержания в почве и большей степенью микробиологической трансформации.

Отбор проб производился раз в месяц, начинался после таяния снега в июне и заканчивался в конце сентября 2021 г.

Результаты графика 1 демонстрируют сезонную динамику концентрации РОУ за 2021г. В начале июня значения концентрации РОУ значительно ниже во всех экосистемах. Предположительно, это может быть связано с низкими температурами, разбавлением воды после весенних паводков. На мочажине концентрация варьируется в пределах 33,64-47,75 мг/л, на гряде концентрация чуть выше 31,14-43,89 мг/л, на ряме зафиксирована максимальная концентрация 38,2-52,41 мг/л. В ручье наблюдается минимальная концентрация РОУ.

В середине июля и августа концентрации РОУ достигают максимума на всех экосистемах. Это связано с увеличением температурных показателей, которые благоприятствуют деятельности микроорганизмов и увеличивают разложение органики. На мочажине концентрации варьируются в пределах 47,61-69,96 мг/л, на гряде 41,52-153,48 мг/л, на ряме 79,61-102,71 мг/л, в ручье 40,99-36,98 мг/л.

К сентябрю, когда количество осадков увеличивается, а температура понижается, значения концентрации на всех экосистемах снизились. На мочажине концентрация упала до 36,92-54,31 мг/л, на гряде 37,38-53,46 мг/л, на ряме 46,46-70,9 мг/л, на ручье 28,86-53,03 мг/л.

Результаты показывают, что содержание РОУ зависит от множества факторов. Одними из основных являются температура, осадки и уровень болотных вод. В июне наименьшее количество осадков соответствует наибольшей концентрации РОУ. Такая тенденция соблюдается во всех микроландшафтах, наиболее выражено это прослеживается в рьях и на грядах, предположительно, это связано с повышенной концентрацией органики в этих местах. К июлю температура повышается, что приводит к испарению, понижению уровня болотных вод, увеличению аэробного слоя и ускорению процессов разложения. Уже в августе с увеличением осадков накопленный углерод вымывается, что приводит к значительному повышению его концентраций в болотных водах. Таким образом, для выявления сезонной динамики углерода необходимы долгосрочные исследования.

В ходе исследования было обнаружено, что концентрация РОУ меняется в зависимости от времени года, типа экосистемы, а также других факторов. Наблюдаемые изменения могут оказать влияние на цикл углерода в экосистеме в целом. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят лучше понять процессы, происходящие на болотах, и их значение для сохранения биоразнообразия и устойчивости экосистем.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта «Наука». Соглашение № 94-ДОН/05.5/20-ЮГУ-231 от 14.12.2020.\

1. Olefeldt D., & Roulet N. T. (2012). Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G1). doi:10.1029/2011jg001819
2. Mclaughlin J. W., Lewin J. C., Reed D. D., Trettin C. C., Jurgensen M. F., & Gale M. R. (1994). Soil factors related to dissolved organic carbon concentrations in a Black spruce swamp, Michigan. *Soil Science*, 158(6), 454–464. doi:10.1097/00010694-199415860-00007
3. Zarov Evgeny, Lapshina Elena, Kuhlmann Iris. Carbon Accumulation and the Possibility of Carbon Losses by Vertical Movement of Dissolved Organic Carbon in Western Siberian Peatlands DOI: 10.3390/f14122393
4. Katheryn Burd, Cristian Estop-Aragonés, Suzanne E. Tank, and David Olefeldt. 2020. Lability of dissolved organic carbon from boreal peatlands: interactions between permafrost thaw, wildfire, and season. *Canadian Journal of Soil Science*. 100(4): 503-515.
5. Kolka R., Weishampel P., & Fröberg M. (n.d.). Measurement and Importance of Dissolved Organic Carbon. *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*, 171–176. doi:10.1007/978-1-4020-8506-2_13
6. Ågren A., Buffam I., Berggren M., Bishop K., Jansson M., & Laudon H. (2008). Dissolved organic carbon characteristics in boreal streams in a forest-wetland gradient during the transition between winter and summer. *Journal of Geophysical Research*, 113(G3). doi:10.1029/2007jg000674
7. F. Worralla, H.S. Gibson, T.P. Burt. Production vs. solubility in controlling runoff of DOC from peat soils – The use of an event analysis

ВЛИЯНИЕ ПАЛЕОПОЖАРА НА ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ГОЛОЦЕНОВОГО ТОРФЯНИКА В ДОЛИНЕ Р. ДУБЧЕС

PALEOFIRE EFFECT ON ORGANIC MATTER OF HOLOCENE PEATLAND IN THE RIVER VALLEY DUBCHES

О.А. Шапченкова, Л.В. Карпенко
O.A. Sharchenkova, L.V. Karpenko

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН -обособленное подразделение
Федерального исследовательского центра СО РАН (г. Красноярск, Россия)
E-mail: sharchenkova@mail.ru

Торфяники (торфяные болота) являются одной из важнейших экосистем мира, занимающей около 3 % площади суши. Начало торфообразования в значительной части болот датируется ранним голоценом – около 10000 лет назад. Торфяники составляют около трети мирового резервуара углерода, хранящего 400–500 Гт углерода (Weissert, Disney, 2013). Накопление углерода в торфяниках происходило за счет положительного экосистемного баланса между его фиксацией растениями и окислительными потерями в результате дыхания и пожаров (Flanagan et al., 2020). За последние 8000–10000 лет торфяники на территории Средней и Приенисейской Сибири неоднократно были пройдены пожарами. Наибольшее количество пожаров возникало 8300–8000, 6000–5000 и около 3200 лет назад (Кошкарлова, 1986). Признаками пожаров являются прослойки золы и углей, сохраняющиеся в торфяниках. Пожары играют важную роль в понимании развития болот, реконструкции климата и растительного покрова в прошлом. Показано, что пожары увеличивают пул стабильного углерода за счет увеличения ароматичности органического вещества (ОВ) (Weissert, Disney, 2013). Целью данной работы являлась оценка изменения состава и свойств органического вещества торфяника после палеопожара с помощью методов термического анализа.

Исследования проводили в районе «Международной обсерватории высотной мачты ZOTTO» (с. Зотино, Красноярский край). Болотный массив площадью около 3 км² залегает в долине нижнего течения р. Дубчес, которая является левым притоком р. Енисей.

Образцы торфа отбирали при помощи ручного бура системы Гиллера сплошной колонкой с интервалом 5 см. Мощность торфяной залежи в точке бурения составила 4,15 м. На глубинах 3,25, 3,15, 2,90 и 2,65 м обнаружены пироген-

ные прослойки разной мощности (от 2 до 3 см). Ботанический анализ торфа проведен по ГОСТ 28245-89 (2006) с использованием микроскопа «Leitz Wetzlar». Возраст образцов был получен на основе радиоуглеродного датирования торфа методом ускорительной масс-спектропии (3-MV Tandetron ion accelerator) в Институте биогеохимии им. Макса Планка (Йена, Германия). Ботанический состав торфа описан ранее (Карпенко и др., 2022).

Исследование ОВ торфа проводили методами термического анализа. Для изучения выбраны два образца торфа, которые имели одинаковый ботанический состав (Табл. 1).

Таблица 1. Характеристика исследованных слоев торфа

Глубина, м	Состав растений-торфообразователей, %	Вид торфа	Возраст торфа, кал. л. н.
2,60–2,65	Кора и древесина березы – 70, кора сосны – 10, хвощ – 5, пушица – 5, осоки – 5, сфагновые мхи – 5	Березовый	5608
2,65–2,70	Кора и древесина березы – 60, кора сосны – 10, хвощ – 5, пушица – 10, осоки – 5, сфагновые мхи – 10	Березовый	5767

Это сводит к минимуму влияние различий в химическом составе растений-торфообразователей на показатели термической деструкции ОВ. Слой 2,65–2,70 м характеризовался наличием признаков пожара. Слой 2,60–2,65 м был выбран в качестве контроля.

Пробоподготовка заключалась в размалывании воздушно-сухих образцов торфа до однородной массы. Термогравиметрию (ТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) проводили в окислительной атмосфере (воздух). ТГ: нагрев от 25 до 850 °С со скоростью 10 °С/мин, тигель корундовый, масса образца \square 10 мг. Термогравиметрическая кривая (ТГ) отражает потерю массы, дифференциальная термогравиметрическая кривая (ДТГ) – скорость потери массы. Параметр Т50 – температура, при которой наблюдается половина потери массы ОВ. ДСК: нагрев от 25 до 590 °С со скоростью 10 °С/мин, тигель алюминиевый, эталон – пустой алюминиевый тигель, масса образца \square 0,7 мг. Повторность измерений двукратная.

Для каждой термограммы ДСК мы разделили площадь под кривой ДСК между 150 и 590 °С на три температурные области, которые представляют собой различные уровни устойчивости ОВ к термодеструкции: лабильные органические вещества (150 < T1 < 375 °С), в основном полисахариды и другие алифатические соединения; термически устойчивые (термостабильные) органические вещества (375 < T2 < 475 °С), такие как лигнин и другие полифенолы; очень термически устойчивые органические вещества (475 < T3 < 550 °С), такие как конденсированные ароматические соединения

(Campo, Merino 2016). Мы рассчитали величины парциальной теплоты (Q_1 , Q_2 и Q_3) термической деструкции ОВ по термограммам ДСК с помощью программного обеспечения **Netzsch Proteus® Software**. Парциальная теплота определялась как доля тепла, выделившегося в определенном температурном диапазоне, от общего количества тепла.

Методы термического анализа, такие как ТГ и ДСК, используются для характеристики ОВ почв и гумусовых кислот. Термическое разложение полисахаридов (гемицеллюлоз, целлюлозы), дегидратация алифатических структур и декарбоксилирование карбоксильных групп происходят между 200–350 °С. При более высокой температуре наблюдается деструкция лигнина и ароматических структур (Dell'Abate et al., 2003).

Термограммы, полученные в результате термического анализа образцов торфа в окислительной атмосфере, представлены на рис. На кривых ДСК процесс термодеструкции образцов торфа характеризовался слабовыраженным эндотермическим эффектом (пик при 64–70 °С), обусловленным испарением гигроскопической влаги, и экзотермическими реакциями (плечо и пик между 150–590 °С) из-за разложения компонентов ОВ с возрастающей термостабильностью.

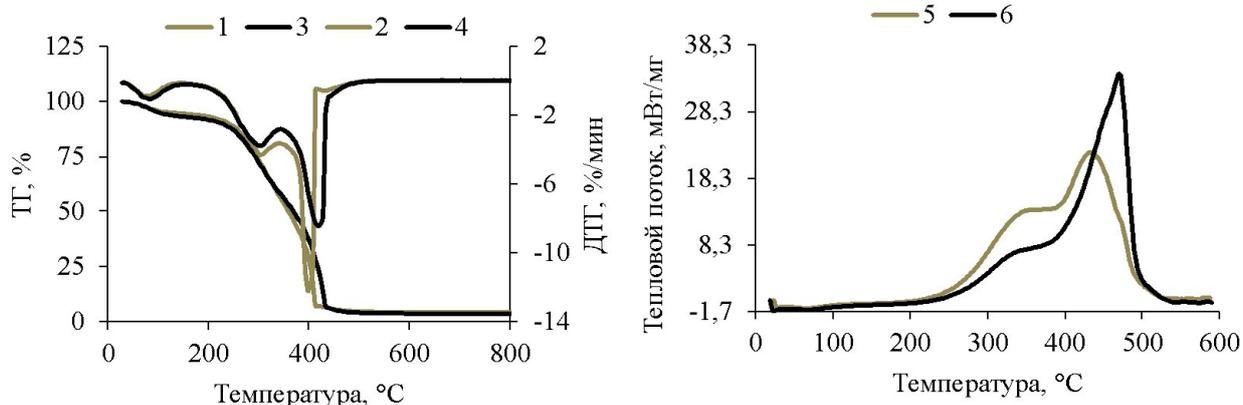


Рисунок. Термограммы образцов торфа: ТГ/ДТГ (слева), ДСК (справа). 1, 2, 5 – контроль, 3, 4, 6 – после пожара

Из формы кривой ДСК видно, что в результате прохождения пожара, плечо, обусловленное разложением полисахаридов (термолабильные компоненты) редуцировано, а пик деструкции термостабильных компонентов выше и более четко выражен по сравнению с контролем. На кривых ДТГ эндотермическим и экзотермическим реакциям соответствовали пики, отражающие стадии потери массы.

Результаты термогравиметрии свидетельствуют, что образец торфа после пожара (слой 2,65–2,70 м) характеризуется более высокой температурой испарения гигроскопической влаги и повышенным ее содержанием, меньшей долей термолабильных компонентов и небольшим увеличением потери массы термостабильных соединений по сравнению с контролем (Табл. 2).

Таблица 2. Параметры термодеструкции образцов торфа: результаты ТГ

Глубина, м	$\frac{T_{\text{интервал1}}}{T_{\text{пика1}}}, ^\circ\text{C}$	ПМ1, %	$\frac{T_{\text{интервал2}}}{T_{\text{пика2}}}, ^\circ\text{C}$	ПМ2, %	$\frac{T_{\text{интервал3}}}{T_{\text{пика3}}}, ^\circ\text{C}$	ПМ3, %	T50, $^\circ\text{C}$	ОМ, %
2,60–2,65	$\frac{30-160}{77\pm 1}$	5,50±0,13	$\frac{160-340}{305\pm 1}$	36,56±0,47	$\frac{340-540}{403\pm 5}$	53,15±0,42	363±2	4,91±0,95
2,65–2,70	$\frac{30-160}{83\pm 1}$	6,74±0,36	$\frac{160-342}{303\pm 1}$	34,04±0,64	$\frac{342-540}{419\pm 1}$	54,91±0,4	377±2	4,02±0,62

Примечание: T – температура, ПМ – потеря массы, ОМ – остаточная масса

Более высокое содержание влаги, вероятно, связано с тем, что обугленный материал со временем подвергся окислению. Это привело к снижению ранее высокой гидрофобности, которая характерна для свежих углей (Knicker, 2011). Кроме того, возобновление растительного покрова после пожара способствовало поступлению органического материала. Температура пика разложения термолабильных компонентов практически не изменилась, а термостабильных – увеличилась на 16 $^\circ\text{C}$. Это обусловлено присутствием в составе ОВ соединений с более высокой устойчивостью к термоокислению. Уве-

личение T50 на 14 $^\circ\text{C}$ также свидетельствует, что в результате пожара образовались соединения с более высокой термостабильностью. На это указывает повышение температуры экзотермического пика на кривой ДСК с 434 до 470 $^\circ\text{C}$ и более высокие величины Q_2 и Q_3 , которые отражают термодеструкцию устойчивых и очень устойчивых соединений (Табл. 3). Полученные результаты согласуются с работами других авторов и нашими данными, которые получены ранее при исследовании пирогенного ОВ методами термического анализа (Santín et al., 2017; Shapchenkova et al., 2023).

Таблица 3. Параметры термодеструкции образцов торфа: результаты ДСК

Глубина, м	$T_{\text{пика1}}, ^\circ\text{C}$	$-Q_{\text{эндо}}, \text{Дж/г}$	$T_{\text{пика2}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пика3}}, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{экзо}}, \text{кДж/г}$	$Q_1, \%$	$Q_2, \%$	$Q_3, \%$
2,60–2,65	64±3	51,52±6,88	плечо	434±1	18,2±0,2	38	57	5
2,65–2,70	70±4	50,98±4,13	плечо	470±1	18,0±0,6	24	63	13

Примечание: T – температура; $-Q_{\text{эндо}}$ – эндозффект; $Q_{\text{экзо}}$ – экзозффект; Q_1, Q_2, Q_3 – парциальная теплота

Остаточная масса отражает зольность торфа, которая характеризуется как низкая. По зольности исследуемые образцы близки (Табл. 2). Это косвенно свидетельствует, что при палеопожаре происходило лишь обугливание растительного материала.

Термический анализ (ТГ/ДТГ, ДСК) показал, что пожар способствовал обогащению ОВ торфа термостабильными соединениями. Анализ результатов термогравиметрии позволяет предположить, что пожар не был высокоинтенсивным.

Исследование выполнено в рамках Базового проекта ФИЦ КНЦ СО РАН FWES-2024-0028 «Биоразнообразие лесов Сибири: эколого-динамический, генетико-селекционный, физико-химический и ресурсно-технологический аспекты»

- Карпенко Л.В., Гренадерова А.В., Михайлова А.Б., Подобуева О.В. Реконструкция локальных пожаров в голоцене по данным содержания макрочастиц угля в торфяной залежи в долине реки Дубчес // Сибирский лесной журнал, 2022. № 4. С. 3–13.
- Кошкарлова В.Л. Семенные флоры торфяников Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 121 с.
- Campo J., Merino A. Variations in soil carbon sequestration and their determinants along a precipitation gradient in seasonally dry tropical forest ecosystems // Global Change Biology, 2016. V. 22(5). 1942–1956.
- Dell'Abate M.T., Benedetti A., Brookes P.C. Hyphenated techniques of thermal analysis for characterization of soil humic substances // Journal of Separation Science, 2003. V. 26. P. 433–440.
- Flanagan N.E., Wang H., Winton S., Richardson C.J. Low-severity fire as a mechanism of organic matter protection in global peatlands: Thermal alteration slows decomposition // Global Change Biology, 2020. V. 26. P. 3930–3946.
- Knicker H. Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in soil environments // Quaternary International, 2011. V. 243. P. 251–263.

7. Santín C., Doerr S.H., Merino A., Bucheli T.D., Bryant R., Ascough P., Gao X., Masiello C.A. Carbon sequestration potential and physicochemical properties differ between wildfire charcoals and slow-pyrolysis biochars // *Scientific reports*, 2017. V. 7. 11233.
8. Shapchenkova O.A., Loskutov S.R., Kukavskaya E.A. Alteration of organic matter during wildfires in the forests of southern Siberia // *Fire*, 2023. 6(8). 304.
9. Weissert L.F., Disney M. Carbon storage in peatlands: A case study on the Isle of Man // *Geoderma*, 2013.V. 204–205. P. 111–119.

**Biodiversity, typology
and protection of mires**

**Биоразнообразие,
типология и охрана болот**

МЕСТООБИТАНИЯ МЕЛКОБУГРИСТО-ТОПЯНЫХ БОЛОТ (RUBO CHAMAEMORI-DICRANOCHORIEA ELONGATI): ЭДАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И РЕСУРСНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

HABITATS OF RUBO CHAMAEMORI-DICRANOCHORIEA ELONGATI: EDAPHIC FACTORS AND RESOURCE SIGNIFICANCE

Н. А. Булая¹, Д. Д. Карсонова^{1*}, В. В. Нешатаев¹, Т. В. Дьячкова², А. М. Лапина¹

¹ Ботанический Институт им. В. Л. Комарова (г. Санкт-Петербург, Россия)

² ФГБУ «Государственный природный заповедник «Ненецкий» (г. Нарьян-Мар, Россия)

*dariakarson@gmail.com

Ключевой участок находится на северо-востоке Малоземельской тундры, в окрестностях мыса Костяной Нос (ФГБОУ «Заповедник «Ненецкий») и среднем течении р. Ортины, обширной и сильно заозеренной низменности. Ландшафт представляет собой преимущественно достаточно дренированные повышения, занятые кустарничково-лишайниковой тундрой на песчаном субстрате, в депрессиях рельефа находятся плоско- и мелкобугристые торфяники, переходящие в приозерные понижения и топи. Территория ключевого участка относится к категории позднеосенних пастбищ. Плоско- и мелко-бугристые торфяники относятся к категории местообитаний Ab3.3 (торфяники в депрессиях рельефа на террасах разного уровня, где в голоцене происходило активное торфонакопление), диагностируемой территориальной единицей растительности (ТЕР) *Rubo chamaemori–Dicranochorietea elongati* (см. наст. сборник Лавриненко, Лавриненко, 2024). Местообитания, описанные на ключевом участке, отнесены к подкатегории Ab3.3.3 – мелкобугристо-топяные болота. Диагностическая ТЕР – *Rubo chamaemori–Dicranetum elongati caricetosum rariflorae–Carici rariflorae–Sphagnochorietum baltici*. Почвы полугидроморфные (на буграх пучения) и гидроморфные (в топях между буграми). Характерны торфяные олиготрофные и эутрофные почвы (Histosols) в топях, остаточные эутрофные почвы на буграх пучения, реже торфяно-подбурь. Растительность представлена кустарничково-морозово-мохово-лишайниковыми сообществами, в которых постоянны характерные виды союза *Rubo chamaemori–Dicranion elongati* O. et I. Lavrinenko 2015. В мохово-лишайниковом покрове доминируют *Dicranum elongatum*, *Ptilidium ciliare*, кустистые кладонии (*Cladonia arbuscula*, *C. rangiferina*) с ПП до 60% (средняя высота на описанных площадках 8 см) и *Flavocetraria nivalis* (ПП до 30%). Часто встречаются *Cladonia*

stellaris и по понижениям – *Cetrariella delisei*, *Cetraria islandica* subsp. *crispiformis* (ПП до 15%) и *Sphagnum balticum*; в травяно-кустарничковом ярусе доминирует *Rubus chamaemorus* (ПП до 30%), менее заметно присутствие *Vaccinium vitis-idaea* и *V. uliginosum*, травы представлены *Luzula confusa*, *Poa arctica*. На четырех описанных пробных площадях мы измерили продуктивность *Rubus chamaemorus*, которая варьирует от 32.04 г/м² для площадок с небольшим ПП (до 15%) и до 108.44 г/м² (ПП до 75%). В сообществах мелкобугристо-топяных болот кустарнички с высоким обилием произрастают на буграх пучения, на почвах с относительно низкой влажностью, не оглеенных, с относительно высокой зольностью и с погребенным гумусовым горизонтом, в случае торфяно-подбуров (средняя отрицательная связь проективного покрытия кустарничков с наличием оглеения и влажностью, и положительные связи с наличием погребенного гумусового горизонта и зольностью торфяного горизонта). На буграх пучения, и в понижениях между ними, обилие трав выше на влажных (до определенного уровня) и уплотненных почвах. Для сообществ со значительным покрытием лишайников (50% и более) характерны почвы с более разложившимся органическим веществом, затронутые криогенными процессами. Высокое проективное покрытие мохообразных характерно для понижений между буграми с повышенным увлажнением почв. В понижениях между буграми в травяном ярусе значимо присутствие видов асс. *Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii* Andreev ex Lavrinenko, Matveyeva et Lavrinenko 2016 (*Carex rariflora*, *C. rotundata*, *Eriophorum vaginatum*), сомкнутость трав составляет до 80%. Для сообществ характерно доминирование олиготрофных видов сфагновых мхов (Лавриненко и др., 2016). В почвах под осоково-моховыми сообществами сырых топей продолжается про-

цесс торфообразования, причем верхние слои торфа имеют слабую степень разложения. В торфяных горизонтах почв уровень кислотности близок к нейтральному ($\text{pH}_{\text{ср.}} = 5.9$), при этом, чем ближе реакция среды к нейтральной, тем выше число видов в сообществе. В этих почвах высокое содержание органических веществ в форме слабо- и среднеразложенного торфа за счет постоянного увлажнения (средне-высокая степень влажности почв). Общее число видов положительно коррелирует с зольностью торфяного горизонта. Для бугров пучения, где влажность меньше, типичной ассоциацией является

асс. *Rubo chamaemori–Dicranetum elongati* Dedov ex Lavrinenko et Lavrinenko 2015 субасс. *caricetosum rariflorae* Lavrinenko et Lavrinenko 2015. Для данного типа местообитаний характерны торфяные остаточо-эутрофные почвы (Hemic Dystric Histosol) со средней степенью разложенности торфа, что связано с затуханием современного торфообразования и формированием в верхней части профиля более оструктуренного перегнойного горизонта. Торфяные горизонты имеют слабокислую реакцию, среднюю степень влажности. Зольность горизонтов варьирует от 6.8 до 24.7%.

1. Лавриненко И. А., Лавриненко О. В. 2024. Каталог местообитаний болот восточноевропейских тундр (в печати). (Настоящий сборник материалов симпозиума).
2. Лавриненко О. В., Матвеева Н. В., Лавриненко И. А. 2016. Сообщества класса *Scheuchzerio–Caricetea nigrae* (nordh. 1936) tx. 1937 в восточноевропейских тундрах. Растительность России, СПб. № 28, 5558.

БОЛОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В СИСТЕМЕ ООПТ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

SWAMP COMPLEXES IN THE SPNA SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN

К.А. Брагина¹, Л.А. Курбанова¹, Р.Ш. Фатхутдинова¹
K.A. Bragina¹, L.A. Kurbanova¹, R.Sh. Fatkhutdinova¹

¹Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа, Россия)
 E-mail: ksuhandr01@yandex.ru

В настоящее время на территории Республики Башкортостан есть 27 памятников природы (6 ботанических и 21 комплексный), где осуществляется охрана болот. Их общая площадь составляет 3600,5 га. Они расположены преимущественно в Зауралье (Учалинский и Абзелиловский районы) и на северо-востоке республики (Дуванский и Салаватский районы). При этом самый большой по площади подобный памятник природы находится в Уфимском районе и представлен популяцией орхидей на Чуркинском болоте (его площадь – 750 га).

Ряд болот республики входит в состав таких ООПТ, как государственный природный заповедник и природный парк. Так, горные болота Ерикташское, Колпаковское, Куянтавское, Моховое, Сычиное и Юрюзанское охраняются на территории Южно-Уральского государственного природного заповедника; в состав природного парка «Иремель» входят болота Карагужинское, Септинское, Тыгинское и Тюлюкское. В равнинной части Башкирского Предуралья болота охраняются в природных парках «Кандры-Куль» и «Аслы-Куль» (Баишева, 2015).

Часть болот включены в республиканские проектируемые ООПТ. Среди них болота Бизгенды и Харасаз (природный парк «Крыкты», Абзелиловский район), болото Моховое (природный парк «Ирендык», Баймакский район) (Баишева, 2015). В таблице указаны проектируемые памятники природы региона с болотами.

Значительное количество болот Республики Башкортостан в последние годы вошло в состав охраняемых территорий, но перспектива образования новых ООПТ с болотными угодьями сохраняется. Часть болот числится в проекти-

руемых ООПТ уже в течение 20 лет (например, болота Муклесаз, Сарысаз, Кирябинское и Журавлиное; Костылевские и Черлакские болота). При этом список предлагаемых для охраны болот постоянно пополняется.

Таблица. Проектируемые памятники природы Республики Башкортостан, включающие болота

№	Наименование	Район
1	Комплекс карстовых болот у с. Бишкаин	Аургазинский
2	Костылевские болота	Балтачевский
3	Муклесаз	Балтачевский
4	Сарысаз	Балтачевский
5	Журавлиное болото	Белорецкий
6	Комплекс карстовых болот у с. Суслово	Бирский
7	Чистые ямки	Бирский
8	Светлое озеро	Гафурийский
9	Комплекс карстовых болот у с. Табынск	Гафурийский
10	Черлакское болото I и II	Дюртюлинский
11	Чумарское болото	Калтасинский
12	Амзинское болото	Краснокамский
13	Ахидское болото	Мишкинский
14	Карагуловское болото	Салаватский
15	Рахметовское болото	Абзелиловский
16	Серафимовское болото	Туймазинский
17	Карюгинское болото	Уфимский
18	Гумасы	Учалинский
19	Кирябинское болото	Учалинский

1. Баишева Э.З., Мартыненко В.Б., Миркин Б.М., Мулдашев А.А., Широких П.С., Бикбаев И.Г. Болота республики Башкортостан как объект первостепенной охраны // Вестник Академии Наук РБ. 2015, том 20, № 3(79). С. 5-13.

СОСУДИСТЫЕ РАСТЕНИЯ БОЛОТ БАСЕЙНА РЕКИ МАЛАЯ СОСЬВА

VASCULAR PLANTS OF THE MARSHES OF THE MALAYA SOSVA RIVER BASIN

А.Л. Васина

A.L. Vasina

ФГБУ «Государственный заповедник «Малая Сосьва»
(г. Советский, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Россия)
e-mail: msosva@gmail.com

Основным районом изучения растительного покрова болот бассейна р. Малая Сосьва явилась территория заповедника «Малая Сосьва» (учрежден в 1976 г.), расположенная в бассейне одноименной реки (правый приток р. Северная Сосьва, впадающей в Обь), в административных границах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры Тюменской области. Площадь заповедника 225,562 тыс. га. Изученная территория находится в прилегающей к Уралу северозападной части Западной Сибири и входит в состав Обь-Иртышской геоботанической провинции Кондо-Сосьвинского среднетаежного кедрово-сосново-болотного округа (Растительный покров..., 1985). Территория заповедника характеризуется, в целом, расчлененным рельефом, значительным врезом речных долин, развитой речной системой. Равнинные места чередуются с возвышенностями (увалами). Избыточное увлажнение связано преимущественно с плоскими формами рельефа, депрессиями, тяжелыми почвообразующими породами. Площадь заповедника, занятая болотами, составляет 32413,2 га или 14,4% от всей его площади. Преобладают верховые болота на плоских водоразделах или на речных террасах, не затопляемых весенне-летними водами. Переходные и низинные болота расположены преимущественно в долинах рек.

В результате проведенных исследований на болотах заповедника и в его окрестностях зарегистрировано 186 видов сосудистых растений (43,8% от общего числа сосудистых растений изученной территории) из 45 семейств. В таксономическом спектре флоры болот доминирует семейство **Сурегасеае (40 видов)**. Второе и третье места в семейственном спектре занимают **Роасеае (15)** и **Салисасеае (11)**. В число ведущих семейств входят **Орхидасеае (9 видов)**, **Ранункуласеае (9)**, **Астерасеае (8)**, **Эриказеае (8)**, **Апиасеае (6)**, **Эquisетасеае (5)**, **Полигонасеае (5)**, **Росасеае (5)**. Ведущие семейства включают 121 вид (65,1%). Одновидовыми являются 15 семейств (33,3%). Родовой спектр фло-

ры болот возглавляют роды *Carex* (25 видов) и *Salix* (11). В число десяти наиболее крупных родов входят *Eriophorum* (7 видов), *Ranunculus* (6), *Equisetum* (5), ***Eleocharis*** (5).

Анализ биологического спектра флоры болот по классификации К. Раункиера показал преобладание гемикриптофитов – 98 видов (52,7%). Второе место занимают криптофиты – 48 видов (25,8%), третье – фанерофиты – 22 вида (11,8%). Наименьшее число видов относится к хамефитам – 11 (5,9%) и терофитам – 7 (3,8%).

Разнообразие экологических условий на болотах обеспечивает произрастание на них видов разных эколого-фитоценологических групп. Группа болотных видов – 97 (52,1%) включает 3 подгруппы. Первая объединяет виды, требовательные и умеренно требовательные к минеральному питанию – 59 видов (60,8% от числа видов группы). К этой подгруппе относятся виды евтрофных и мезотрофных болот, безлесных обводненных топей и облесенных болот. Большинство растений – виды травяно-сфагновых мезотрофных болот: *Calamagrostis neglecta* (Ehrh.) Gaerth., Mey. et Scherb., *Calla palustris* L., *Caltha palustris* L., *Carex aquatilis* Wahlenb., *C. rostrata* Stokes, *C. vesicaria* L., *Cicuta virosa* L., *Comarum palustre* L., *Equisetum fluviatile* L., *Menyanthes trifoliata* L., *Pedicularis karoii* Freyn, *Poa palustris* L., *Rumex aquaticus* L. и др. Виды, характерные для ключевых болот – *Cardamine nimanii* Gand., *Carex dioica* L., *Rumex acetosa* L., *Saxifraga hirculus* L., *Stellaria crassifolia* Ehrh., *Trichophorum alpinum* (L.) Pers., *Triglochin palustre* L. К видам открытых обводненных топей относятся *Carex diandra* Schrank, *C. lasiocarpa* Ehrh., *C. limosa* L., *Eriophorum polystachyon* L., *E. russeolum* Fries, *Scheuchzeria palustris* L., *Thelypteris palustris* Schott, *Utricularia minor* L. и др. Вторая подгруппа включает виды наиболее характерные для олиготрофных болот, самая малочисленная – 7 видов (7,2%), среди которых *Carex chordorrhiza* Ehrh., *Rhynchospora alba* (L.) Vahl, *Drosera anglica* Huds., *Juncus stygius* L. К третьей подгруппе отнесены болотные виды с широкой

фитоценотической амплитудой - 31 вид (32%). К этой подгруппе относятся многие широко распространенные и массовые преимущественно болотные виды, которые часто растут в заболоченных и сухих лесах с высоким уровнем грунтовых вод: *Andromeda polifolia* L., *Betula nana* L., *Bistorta major* S.F.Gray, *Calamagrostis purpurea* (Trin.) Trin., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Empetrum hermaphroditum* Hagerup, *Eriophorum vaginatum* L., *Ledum palustre* L., *Ranunculus lapponicus* L., *Rubus chamaemorus* L., *Salix lapponum* L., *S. phyllicifolia* L., *Vaccinium uliginosum* L. и др. Велика доля в структуре флоры болот лесных видов – 42 (22,6%), среди которых *Betula pubescens* Ehrh., *Picea obovata* Ledeb., *Pinus sibirica* Du Tour, *P. sylvestris* L. *Pyrola minor* L., *P. rotundifolia* L. На болотах отмечены некоторые луговые – 18 (9,7%), прибрежные – 17 (9,1%), прибрежно-водные - 7 (3,8%) и водные - 5 (2,7%) виды. Выявлены чужеродные виды *Bidens radiata* Thuill., *Tephrosia palustris* (L.) Reichenb., *Typha latifolia* L.

По встречаемости преобладают виды, представленные спорадически - 70 (37,6%). Большую долю занимают виды, встречающиеся редко - 54 (29%). На третьем месте группа часто встречающихся видов – 36 (19,4%). К очень частым видам относятся 11 видов (5,9%), которые характеризуются и наиболее высоким обилием в свойственных им местообитаниях (*Andromeda polifolia*, *Betula nana*, *Carex cespitosa*, *C. rostrata*, *Chamaedaphne calyculata*, *Equisetum fluviatile*, *Eriophorum vaginatum*, *Ledum palustre*, *Menyanthes trifoliata*, *Oxycoccus palustris*, *Rubus chamaemorus*). На болотах выявлено 15 (8,1%)

очень редких видов, из которых 8 - лесные, 5 – болотные, по 1 виду – опушечно-луговой и прибрежный.

Из числа редких растений болот 1 вид - *Dactylorhiza traunsteineri* (Saut.) Soó, занесен в Красную книгу Российской Федерации (2008), 21 вид - в Красную книгу Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и её приложение (2013): ***Cardamine nymanii***, *Chrysosplenium tetrandrum* (Lund) ex Malmgr. Th. Fries, ***Coeloglossum viride* (L.) C. Hartm.**, ***Corallorhiza trifida* Chatel.**, ***Cortusa matthioli* L.**, ***Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó**, ***D. traunsteineri***, ***Delphinium elatum* L.**, ***Hammarbya paludosa* (L.) O. Kuntze**, ***Huperzia selago***, ***Juncus stygius***, ***Listera cordata* (L.) R. Br.**, *L. ovata* (L.) R. Br., *Pinguicula villosa* L., *Platanthera bifolia* (L.) Rich., *Saussurea parviflora* (Poir.) DC., ***Saxifraga hirculus***, ***Thelypteris palustris***, *Trichophorum alpinum*, ***Triglochin maritimum* L.**, ***T. palustre***.

Таким образом, видовое разнообразие сосудистых растений болот бассейна р. Малая Сосьва является достаточно высоким, составляя около половины видового состава флоры изученной территории. «Ядро» флоры болот составляют собственно болотные виды (52,1%). На болотах отмечены лесные виды (22,6%), луговые (9,7%), прибрежные (9,1%), прибрежно-водные (3,8%) и водные (2,7%), большинство из которых встречаются редко, имеют низкую численность и многие являются случайными. Болота бассейна р. Малая Сосьва являются местами произрастания редких видов растений, большая роль в сохранении которых принадлежит заповеднику «Малая Сосьва».

1. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). 2008. М.: Товарищество научных изданий КМК. – 885 с.
2. Красная книга Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: животные, растения, грибы / отв. ред. А. М. Васин, А. Л. Васина. – Екатеринбург: Издательство Баско, 2013. – 460 с.
3. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. 1985. Новосибирск: Наука. – 249 с.

ПОСТПИРОГЕННОЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ ДРЕВОСТОЯ В ОСУШЕННЫХ СОСНЯКАХ КУСТАРНИЧКОВО-СФАГНОВЫХ

POST-FIRE RENEWAL OF THE TREE STAND IN DRAINED DWARF-SHRUB SPHAGNUM PINE FORESTS BOGS

*С.Э. Вомперский¹, Т.В. Глухова¹, Н.А. Валяева¹, А.В. Головченко²
S.E. Vompersky¹, T.V. Glukhova¹, N.A. Valyaeva¹, A.V. Golovchenko²*

¹ Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Россия)

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения (г. Москва, Россия)

e-mail: root@ilan.ras.ru, golovchenko.alla@gmail.com

Пожары в лесах на осушенных торфяниках изучены значительно меньше, чем пожары в лесах на естественных болотах и минеральных почвах. (Вомперский и др., 2007). По данным статистики, частота пожаров в осушенных лесах не превышает таковую в неосушенных, так как при засухе способность к загоранию верхнего слоя горючих материалов в обоих случаях примерно одинакова (Курбатский, 1970). Отмечено, что вероятность и последствия торфяных пожаров будут расти из-за изменения климата (Flannigan et al., 2009).

Исследования проводились на осушенном открытыми каналами верховом болоте центрально-олиготрофного типа «Сосвятское» Западнодвинского лесоболотного стационара Института лесоведения РАН в Тверской области (N 56°09', E 32°10'). Торфяная залежь исследуемого болотного массива имеет мощность 3 м, на окрайке болота – 0,8 м. Залежь сложена сфагновыми торфами, степень разложения которых не превышает 20-25%. Объемная масса (плотность) в верхнем полуметровом слое пробных площадей варьирует от 0,050 до 0,087 г/см³, зольность – от 3 до 5%. Радиоуглеродный возраст торфяника составляет 9500±1400 cal BP (МГУ - 1108).

Пожар, произошедший в августе 1999 г., охватил 29 га юго-западного склона болота, где опытная осушительная сеть, проложенная в 1972 г., имела расстояния между каналами от 60 до 160 м при глубине их ко времени пожара 1 м. Причина пожара – небрежное обращение с огнем сборщиков ягод.

В сосняках кустарничково-сфагновых, пройденных огнем, заложили четыре пробные площади (ПП) от 0,15 до 0,24 га в репрезентативных местах с учетом интенсивности пожара, т.к. выгорание было неравномерным, осушения - расстояния между осушительными каналами, уровня болотных вод (УБВ), варьирующего на

разных участках болота (вблизи каналов и на удалении от них). Пробные площади ПП1, ПП2 и ПП4 расположены между осушительными каналами с расстоянием 160 м, 60 м и 106 м соответственно, ПП3 – на окрайке болота. Секции на ПП, примыкающие к осушительным каналам, обозначены 1а, 1а-к (узкая полоса вдоль кавальера канала), 2а, 2б, 4а.

На исследуемом болоте до пожара произрастали разновозрастные (40-130 лет) сосняки кустарничково-сфагновые III-IV классов текущего бонитета. В сосняках проводили переисчислительную таксацию по ступеням толщины с определением диаметра (d), высоты (h) и возраста древостоя. Древостои рассматривались как условно двухъярусные.

Учет возобновления древесного яруса проводили на площадках 1x1 м в 10-кратной повторности на каждой ПП в разных зонах послепожарного микрорельефа и степени повреждения огнем. Учет семенного возобновления древесных пород проводили на площадках размером 20x20 см так же в 10-кратной повторности на следующий год после пожара, затем на 2, 3 и 15 годы.

В первые годы на ПП1, ПП2 и ПП4 гибель деревьев II яруса приближалась к 100%, а на ПП3 она составляла 89%. Доля погибших деревьев I яруса характеризовалась меньшими величинами (63-98%) на болотном массиве и 53% – на окрайке болота. Основной отпад древостоя произошёл в первые годы после пожара, что подтверждают и другие исследователи (Архипов, Залесов, 2017; Иванова и др., 2014). Во всех случаях причиной гибели деревьев были ожоги или сгорание камбиального слоя стволов и хвои тонкомера, выгорание мелких корней в поверхностном слое торфяной почвы и повреждение (отмирание) камбия толстых корней у основания стволов.

На ПП1, включая секции, деревья погибли от теплового удара, высота нагара на стволах до-

стигала 2,8 м, огонь доставал нижние ветви. Корни деревьев почти не пострадали, огонь бегло прошел по кустарничкам, поразив камбиальный слой стволов. Беглый огонь не затрагивает торфяную почву и пожар не переходит в почвенный. Глубина прогорания торфа местами составляла 1-2 см. На узкой полосе вдоль кавальера канала напочвенного покрова не осталось. На третий год после пожара на этой ПП живых деревьев не осталось.

Древостой на ПП2 в равной мере пострадал от теплового удара и повреждения корней. На этой площади произошли сильные вывалы древостоя и прогорание торфа на 7-11 см в приканальных полосах. Спустя 2-3 года после пожара сохранилось несколько десятков сосен.

На ПП3, расположенной в облесенном кольце, низовой пожар местами переходил в почвенный. На этих местах выгорел значительный слой торфа, иногда до 20-25 см, в среднем 12-15 см. Объясняется это тем, что структура сложения древесных корневых систем на болотах многоярусная. Из-за этой ступенчатости образуются пустоты, обуславливающие при горении тягу, как в печке. Пламя быстро занимает это пространство.

На ПП4 в приканальной полосе погиб весь древостой, сосны диаметром до 4 см сгорели вместе с кронами так, что при перечете было невозможно измерить их высоты. Торф в среднем прогорел на 5-10 см.

Наибольшая или полная гибель древостоя, при рассмотрении её по каждой ПП, про-

изошла в приканальных полосах (2а, 2b и 4а), интенсивнее осушенных, по сравнению с серединой между каналами (2 и 4). Исключением стала ПП1 (откуда начался пожар), на которой погибли все деревья.

Таким образом, изучаемый пожар имел катастрофические последствия для более продуктивных, чем до осушения, сосняков (Кудряшев, 2011). Отпад древостоя привел к гибели 80-90% древостоя I яруса и 100% – деревьев II яруса. Можно предположить, что лесные экосистемы на осушенных торфяниках более ранимы, чем на естественно дренированных минеральных почвах, где низовой пожар не переходит в почвенный и практически отсутствуют опасные агенты горимости, в виде хорошо развитого яруса болотных кустарничков, способствующих воспламенению, как напочвенного покрова, так и верхних слоёв торфа (Вомперский и др., 2007).

Возобновление древесных пород на горях осушенных болот в первые годы идет аналогично естественно дренированным местопроизрастаниям, сразу после пожара возникают благоприятные почвенные условия для появления всходов. Лиственные (береза *Betula pubescens Ehrh.* и осина *Populus tremula L.*) в первые после пожара годы дают всходы по выгоревшим участкам, но хороший прирост показывают лишь по микропонижениям. На второй год после пожара меньше всего всходов березы появляется на более выгоревших местах (1а-к, 2 а, 4а), а всходы осины отсутствуют (табл.). Наибольшее количество всходов березы появляется на третий год после пожара.

Таблица. Семенное возобновление (всходы) древесных пород (103шт/га) после пожара

№ секций ПП	Второй год			Третий год			Пятнадцатый год		
	Береза	Осина	Сосна	Береза	Осина	Сосна	Береза	Сосна	Ель
1	18,0	2,0	-*	130,0	58,0	8,0	8,7	5,2	0,100
1а	46,0	46,0	-	168,0	128,0	6,0	9,4	4,3	0,114
1а-к	3,0	-	-	77,0	110,0	7,0	36,6	20,0	0,156
Среднее	26,3	17,9	-	136,8	90,6	7,1	12,7	6,8	0,113
2	37,0	87,0	-	240,0	377,0	23,0	25,9	5,1	0,158
2а	6,0	-	-	118,0	34,0	12,0	26,1	4,9	0,088
2b	34,0	-	2,0	176,0	18,0	12,0	26,8	2,5	0,123
Среднее	25,7	29,0	0,7	178,0	143,0	15,7	26,3	4,2	0,123
3	75,0	11,0	-	346,0	56,0	6,0	35,4	4,9	0,416
Среднее	75,0	11,0	-	346,0	56,0	6,0	35,4	4,9	0,416
4	48,0	30,0	-	320,0	316,0	6,0	13,3	1,8	-
4а	4,3	-	-	228,3	58,6	-	19,8	2,8	-
Среднее	26,2	15,0	-	274,2	187,3	3,0	16,6	2,3	-

Примечание. * – нет всходов

Густота 2-3 летних всходов березы достигала 346 тыс. шт/га на ПП3 по менее выгоревшим местам, предельная высота отдельных особей – до 135 см. Хороший рост березы наблюдали и на ПП4 (320 тыс. шт/га). Максимальную плотность всходов зарегистрировали на участке, отдаленном от канала на 25-30 м. Следует отметить, что высота отдельных особей достигала максимальных величин в приканальной полосе 4а – до 186 см и в полосе при кавальере канала 1а-к – до 173 см. Семенное возобновление осины, как правило, лучше в зонах микропонижений, образовавшихся после сильного прогорания торфа (ПП2 и ПП4). Возобновление сосны *Pinus sylvestris* L., зависящее от семенных лет, задерживалось. Даже на выгоревших участках ее всходы единичны. Количество самосева с годами пирогенной сукцессии уменьшается, т. к. благоприятные условия для появления всходов нивелируются. Возникала конкуренция со стороны живого напочвенного покрова, влияли погодные условия, глубина прогорания торфа. Через 15 лет после пожара погибла осина (табл.), это отмечено и другими исследователями (Буряк и др., 2011). Березы становилось значительно меньше, чем в первые годы. Густота всходов по сравнению с третьим годом после пожара уменьшилась в 7 раз на ПП2, в 10 раз на ПП1 и ПП3 и в 16 раз –

на ПП4. Берёза достигала высоты 6-8 м на кавальере ПП1 и в приканальной зоне 4а. Некоторые экземпляры находились в угнетенном (сухом) состоянии. Сказывалось нетипичное её место произрастание. Сосна возобновлялась плохо, количество всходов оставалось на уровне первых послепожарных лет. В подросте появилась ель *Picea abies* (L.) Karst в небольших количествах: от нескольких штук на ПП1 и ПП2 до нескольких десятков штук на ПП3. Отсутствовали её всходы на ПП4 (табл.).

Последствия низового пожара в осушенных кустарничково-сфагновых сосняках связаны с гибелью 80-90% продуктивного древостоя I яруса и 100% деревьев – II яруса. Максимальный отпад древостоя выявлен в первые годы после пожара. Деревья пострадали в большей степени в приканальных полосах, которые интенсивнее осушены, чем в середине между каналами. Возобновление древесных пород на гарях в первые годы осуществлялось березой *Betula pubescens* Ehrh. и осинной *Populus tremula* L. Восстановление сосны *Pinus sylvestris* L. происходило с задержкой и зависело от семенных лет. Учёт древостоя через 15 лет после пожара выявил исчезновение осины, сокращение березы в 7-16 раз, возобновление сосны на уровне первых лет, появление в подросте ели

1. Архипов Е.В., Залесов С.В. 2017. Отпад деревьев после низовых лесных пожаров в сосняках Казахского мелкосопочника // Вестник БГАУ. № 4. С. 90–96
2. Буряк Л.В., Сухинин А.И., Каленская О.П., Пономарев Е.И. 2017. Последствия пожаров в ленточных борах юга Сибири // Сиб. экол. журн. № 3. С. 331–339.
3. Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. 2007. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. № 6. С. 35–44.
4. Иванова Г.А., Конард С.Г., Макрае Д.Д. 2014. Воздействие пожаров на компоненты экосистемы среднетаёжных сосняков Сибири. Новосибирск: Наука. 232 с.
5. Кудряшев А.В. 2011. Осушительная мелиорация как средство повышения продуктивности лесов // Повышение продуктивности, рациональное использование и охрана земель лесного фонда. Тр. СПб НИИЛХ. СПб: СПб НИИЛХ. Вып.2 (25). С.26-37.
6. Курбатский Н.П. 1970. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: Красноярский рабочий. С. 5–58.
7. Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. 2009. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Global Change biology. V.15. №3. P.549-560.

ДИНАМИКА ВИДОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОСУШЕННОМ БОЛОТЕ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ КАРЕЛИИ

DYNAMICS OF SPECIES COMPOSITION AND STRUCTURE OF VEGETATION COVER ON DRAINED MIRE IN A MIDDLE TAIGA KARELIA

С.И. Грабовик, Л.В. Канцерова

S.I. Grabovik, L.V. Kantserova

¹ Институт биологии — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск, Россия)
e-mail: Kancerova.L@mail.ru

В Республике Карелия в 60–70 годы XX в. в подзоне средней тайги на лесоболотном научном стационаре «Киндасово» в заказнике Койву-Ламбасу были начаты комплексные научно-исследовательские работы по изучению структуры и динамики болот и заболоченных лесов в естественном состоянии и под влиянием мелиорации. В данной работе представлены результаты 50-летних исследований динамики видового состава растительного покрова мезотрофного травяно-сфагнового болотного массива Койвусуо (61046'22.7" с.ш. и 33029'22.9" в.д.) площадью 40 га, который относится к южно-карельскому варианту аапа болот и имеет торфяную залежь мощностью около 1.5 м.

До осушения (1971 г.). Болото осушено в 1971 г., расстояние между осушительными каналами 100 м. До осушения во флористическом составе участка отмечено 20 видов: деревьев – 2, кустарничков – 4, трав – 8, мхов – 6. Отдельные сосны и березы, высотой 1–2 м, были приурочены к осоково-сфагновым кочкам. Для изучения изменений структуры растительного покрова в центральной части участка было выполнено крупномасштабное картирование. Кочки занимали 36 %, растительный покров которых был представлен фитоценозами *Andromeda polifolia*–*Carex lasiocarpa*–*Sphagnum divinum* + *S. angustifolium*. Сообщества ковров *Carex lasiocarpa*–*Sphagnum subsecundum* и топей *Carex limosa*–*Menyanthes trifoliata* занимали 64%. Анализ динамики растительного покрова приводится на примере растительных сообществ *Carex lasiocarpa*–*Sphagnum subsecundum*, приуроченных к коврам, и *Carex limosa*–*Menyanthes trifoliata*, приуроченных к топям. УПГВ – 2–3 см ниже поверхности сфагнового покрова.

В I-ый период осушения (1971–1978 г.) на месте прежнего кочковато-топяного комплекса сформировался кочковато-равнинный. Кочки *Betula nana*+*Andromeda polifolia*–*S.*

divinum+*S. angustifolium* занимают 33%, ковры *Carex lasiocarpa*–*Menyanthes trifoliata* – 67%. Растительный покров ковров представлен мезотрофными гидрогигрофильными болотными видами сосудистых растений и мхов. Диагностическими видами сообществ данного периода являются *Andromeda polifolia*, *Carex lasiocarpa*, *C. chordorrhiza*, *Menyanthes trifoliata*, *Equisetum fluviatile*, *Sphagnum angustifolium*, *S. divinum*.

Во II-ом периоде осушения (1984–2000 г.) отмечено дальнейшее сглаживание микрорельефа. Через 13 лет (1984 г.) после осушения кочки занимают 50%, а через 30 лет (2000 г.) – 10%; Напочвенный покров ковров через 13 лет сменяется на *Carex lasiocarpa*–*S. angustifolium* (50 %), а через 30 лет – *Pinus sylvestris*–*Betula nana*–*S. angustifolium* (90 %). Растительный покров ковров образован сообществами мезоолиготрофных, гигрофильных болотных видов. В связи с улучшением аэрации корнеобитаемого слоя *Betula nana* усиленно разрастается. В сообществах на коврах разрастаются *Vaccinium vitis-idaea* и *V. uliginosum*, а также *Sphagnum fuscum* и *S. capillifolium*, которые ранее росли на высоких кочках. Зеленые мхи, а именно *Polytrichum commune* и *P. strictum*, полностью заселяют участки с мертвым *Sphagnum subsecundum*, также здесь поселяется и *Polytrichastrum longisetum*. В это же время здесь началось поселение сосны. Общее число стволов составляет до 1103 экз./га, в том числе сосны – 937, березы – 166.

В III-ем периоде осушения (2001–2021 г.) кочки занимали 10%, а на коврах сформировалось сосново-ерниково-сфагновое сообщество (*Pinus sylvestris* – *Betula nana* – *S. angustifolium* (90%). Растительный покров ковров образован олиготрофными, мезогигрофильными лесоболотными видами. В напочвенном покрове за этот период осушения большинство болотных видов (*Betula nana*, *Carex lasiocarpa*, *Eriophorum angustifolium*, *Polytrichum strictum*) продолжают сохраняться,

но жизнеспособность и проективное покрытие их снижаются. В данный период осушения происходит внедрение лесоболотных видов (*Carex dioica*, *C. poupercula*, *C. pauciflora*, *Eriophorum vaginatum*, *Dicranum polysetum*), и в сложении напочвенного покрова они уже играют значительную роль. Эти виды указывают на переменность водного режима и динамические связи болот и лесов. Общее количество стволов деревьев 1766 шт/га, в том числе сосны – 1233, ели – 125, березы 408. Относительная полнота древостоя 0.4.

Через 50 лет после осушения на месте мезотрофного кочковато-топяного травяно-сфагнового комплекса сформировался олиготрофный кочковато-равнинный сосняк ерничково-сфагно-

вый. Причиной смен видового состава в растительных сообществах являются изменения освещенности, увлажнения и трофности. В течение 50 лет после мелиорации на месте кустарничково-травяно-сфагновых сообществ, представленных мезотрофными гидрогигрофильными болотными видами, сформировался сосняк ерничково-сфагновый, образованный олиготрофными, мезогигрофильными лесоболотными видами. Растительный покров до осушения был представлен 20 видами сосудистых растений и мхов, который через 50 лет после осушения увеличился до 25 видов. В сообществах появляются лесоболотные и лесные виды, характерные для таежных лесов.

Работа выполнена по Госзаданию Института биологии КарНЦ РАН: FMEN-2022-0008 № 122031700449-3.

ОСОБЕННОСТИ ВИДОВОГО СОСТАВА ВЕТВИСТОУСЫХ РАКООБРАЗНЫХ (CRUSTACEA: CLADOCERA) СФАГНОВЫХ БОЛОТ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ**SPECIES COMPOSITION OF THE WATER FLEAS (CRUSTACEA: CLADOCERA) IN THE SPHAGNUM BOGS OF NIZHNY NOVGOROD OBLAST****Ю.Ю. Давыдова¹, П.Н. Тютяева^{1*}, А.Н. Неретина², Е.Д. Варакина^{2,3}****Y.Y. Davydova¹, P.N. Tyutyayeva^{1*}, A.N. Neretina², E.D. Varakina^{2,3}**¹ Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина, (г. Нижний Новгород, Россия)² ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (г. Москва, Россия)³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

E-mail: polya1145@yandex.ru

По территории Нижегородской области протекают крупные реки, такие как Ока и Волга, имеющие важное экономическое значение в качестве транспортных артерий для грузовых и пассажирских перевозок (Бадьин и др., 2014). Эти крупные реки наряду с водохранилищами Волжского каскада являются традиционными объектами экологического мониторинга в виду их большой хозяйственной значимости. Благодаря работам Г.В. Шургановой с соавторами наиболее изученными в плане видовой разнообразия в таких водоемах по праву могут считаться ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) (Шурганова и др., 2015; 2021).

Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) – это микроскопические животные, освоившие все типы континентальных водоемов от небольших луж до крупных рек и озер. Кладоцеры служат основой рациона многих беспозвоночных животных, рыб и даже амфибий (Коровчинский и др., 2021а, б).

Фауна кладоцер малых водоемов Нижегородской области, имеющих площадь до 1 тыс. га, по-прежнему остается недостаточно изученной (Шурганова и др., 2021; Sinev, Gavrilko, 2020). При этом малые водоемы могут служить резервуаром как для опасных видов-вселенцев, так и для редких аборигенных видов. Ввиду небольшой площади малые водоемы особенно уязвимы по отношению к возрастающему антропогенному воздействию. Особый интерес в контексте исследования видовой состава ветвистоусых ракообразных вызывают карстовые озера, зарастающие сфагновой сплавиной. Принято считать, что фауна кладоцер сфагновых болот характеризуется небольшим видовым разнообразием и преобладанием широко распространенных эврибионтных видов. В рамках нашей работы мы провели сбор проб из зарастающих сфагновой сплавиной

карстовых озер, а также водоемов и водотоков, расположенных в черте Нижнего Новгорода или небольших населенных пунктов, с целью выявления видов ветвистоусых ракообразных, характерных для карстовых озер.

Материалом для нашего исследования послужили 60 проб. Пробы были отобраны Е.Д. Варакиной, П.Н. Тютяевой и Ю.Ю. Давыдовой в 2022 и 2023 гг. из 17 водоемов и водотоков, расположенных в Нижегородской области и в черте г. Нижний Новгород. Большая часть материала была собрана в осенний период (сентябрь–октябрь). Отбор проб проводили по общепринятой методике при помощи сачка и планктонной сети. Материал на месте фиксировали 96% этиловым спиртом. В лаборатории пробы разбирали под стереомикроскопом Olympus SZX2-ZB10 и прямым микроскопом Olympus BX41 (Olympus Corporation, Япония). Всех представителей Cladocera определяли до вида, группы видов или до уровня рода по определительным ключам (Коровчинский и др., 2021б). Определения заносили в базу данных в формате Microsoft Excel 2007 (Microsoft, США).

По результатам микроскопической обработки материала в исследованных водоемах нами было выявлено 44 вида ветвистоусых ракообразных, принадлежащих к 3 отрядам, 7 семействам и 26 родам. По числу видов в составе фауны лидируют семейства Chydoridae (22 вида) и Daphniidae (13 видов). Остальные семейства представлены двумя и менее видами. Ведущими родами являются: *Ceriodaphnia* (включает 5 видов), *Daphnia* и *Pleuroxus* (по 4 вида в каждом роде), *Alonella* и *Simocephalus* (по 4 вида в каждом роде). На эти 5 родов приходится 43,2% от общего числа выявленных видов кладоцер. Другие роды насчитывают по 2 и менее таксонов. Выявленная таксономическая структура с преоб-

ладанием представителей семейств Chydoridae и Daphniidae в целом типична для малых водоемов. Интересно отметить, что в исследованном материале были встречены все три вида рода *Alonella*, представители которого тяготеют к водоемам с низкой минерализацией, однако не являются строгими олигосапробами (Коровчинский и др., 2021б; Неретина, личные наблюдения).

В озере Большая Кривовка нами было отмечено наибольшее число видов кладоцер – 27 видов. Близкие значения видового богатства были отмечены в озере Силикатное, озере Малая Кривовка, малом водоеме «Кобылья яма» и озере Киркидеево. В этих водоемах было встречено по 26, 25, 24 и 23 вида кладоцер, соответственно. В два раза меньше видов было встречено в озере Первое Щелковское, озере Мещерское, реке Шижме. Эти водоемы насчитывают по 13 видов кладоцер. Число видов кладоцер в Прудах 1 и 2 в два раза ниже по сравнению с предыдущей группой водоемов и составляет 6 и 5 видов, соответственно. Наименьшее число видов кладоцер (всего два вида) обнаружено в Пруду Мамедовском.

Наши данные по видовому богатству сопоставимы с данными, полученными Г.В. Шургановой с соавторами по инвентаризации видового состава гидробионтов малых водоемов. Поэтому можно говорить о том, что видовой состав кладоцер выявлен нами достаточно полно.

Исследованные нами водоемы интересны с точки зрения видового состава ветвистоусых ракообразных. Группа нейстонных кладоцер, прикрепляющихся к поверхностной пленке воды, представлена всего одним видом – *Scapholeberis mucronata* (O.F. Müller, 1776). Планктонные кладоцеры, обитающие в толще воды, насчитывают 8 видов. Это представители родов *Daphnia*, *Bosmina*, *Diaphanosoma*, *Sida*. Большинство видов (35 видов из 44 обнаруженных) принадлежит к так называемому бентосно-фитофильному комплексу, т.е. обитают на поверхности макрофитов и грунта, хотя в некоторых случаях (например, *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller, 1776)) могут выходить в планктон. Среди выявленных таксонов преобладают эвритермные эврибионтные виды. Таких видов насчитывается 35. Их преобладание типично как для водоемов с низкой минерализацией, так и для водоемов, расположенных в черте города и испытывающих высокую антропогенную нагрузку. Однако многие данные о температурных и биотопических предпочтениях ветвистоусых ракообразных нуждаются в переосмыслении. Так, *Simocephalus serrulatus* (Koch, 1841) традиционно считают эврибионтным видом (Коровчинский и др., 2021б). Однако согласно нашим наблюдениям, этот вид тяготеет к водоемам с низкой минерализацией и достаточно обычен в сфагновых

болотах и карстовых озерах. *Lathonura rectirostris* (O.F. Müller, 1785) также часто относят к эврибионтным видам (Коровчинский и др., 2021б). Однако по нашим наблюдениям, сделанным на водоемах Мордовии, Нижегородской и Московской областей, данный вид также тяготеет к обитанию в слабоминерализованных водоемах. Руководствуясь характеристиками, взятыми из авторитетных пособий, мы выделили всего 4 олигосапробных вида (*Camptocercus lilljeborgi* Schödler, 1862, *Diaphanosoma brachyurum* (Liévin, 1848), *Ophryoxus gracilis* (Sars, 1862), *Sida crystallina* (O.F. Müller, 1776)). Тем не менее, их число может быть увеличено в последующих исследованиях на основе специальных наблюдений за распределением некоторых видов, биотопическая приуроченность которых вызывает вопросы. Не менее сложно обстоит ситуация с анализом термических предпочтений кладоцер в исследованных водоемах. Принято считать, что массовое развитие *O. gracilis* связано с понижением температуры (Коровчинский и др., 2021б). Однако в исследованных нами водоемах в основном были встречены лишь единичные особи этого вида.

Интересны находки хищных ветвистоусых ракообразных семейства Chydoridae в исследованных нами пробах. *Anchistropus emarginatus* Sars, 1862 питается тканями гидр (Коровчинский и др., 2021б). Из-за небольшого размера и сходства формы тела с *C. sphaericus* данный вид часто просматривают в гидробиологических пробах. *Pseudochydorus globosus* (Baird, 1843) питается трупами других ракообразных, в особенности кладоцер и копепоид. Поскольку в осенний период в водоемах появляется большое количество не успевших разложиться остатков микроракообразных, то к этому периоду приурочено массовое развитие *Pseudochydorus* в водоемах, в то время как в весенний и летний период этот вид встречается в пробах единично.

По географической приуроченности среди выявленных нами видов кладоцер 17 таксонов принадлежат к так называемому широко распространенному евроазиатскому фаунистическому комплексу. Эти виды имеют протяженные ареалы в пределах Евразии. По трем таксонам (которые были определены нами до уровня рода) данных о географической приуроченности нет. Двадцать три вида (то есть почти половина всех выявленных таксонов) отнесены нами к комплексу нерезвивозанных широко распространенных видов. Все они могут рассматриваться как объекты для дальнейших таксономических ревизий на основе морфологических и молекулярно-генетических данных. Особый интерес в контексте биогеографии представляют собой сделанные Е.Д. Варакиной находки *Eurycercus macracanthus* Frey, 1973 в Пруду Лесной и Пруду 1, расположенных

в Нижнем Новгороде и Нижегородской области, соответственно. Данный вид относится к эндемичному восточно-азиатскому комплексу и, как предполагается, его естественный ареал ограничен восточной частью Палеарктики (Коровчинский и др., 2021б). Поэтому в водоемах Нижегородской области его можно рассматривать

в качестве вселенца. Находки *E. macracanthus* в водоемах Нижегородской области уже были сделаны ранее Д.Е. Гаврилко (Гаврилко и др., 2020). Для подтверждения статуса известных из Нижегородской области популяций *E. macracanthus* необходимо проведение дополнительных молекулярно-генетических исследований.

Работы по определению ветвистоусых ракообразных из рода *Simocephalus* были выполнены А.Н. Неретиной и Е.Д. Варакиной при поддержке гранта РФФ № 22-14-00258.

1. Бадьин М.М., Асташин А.Е., Рыжов Е.В., Чебурков Д.Ф., Асташина Д.А. Инвентаризация и пространственный анализ туристско-рекреационных ресурсов бассейна малой реки на основе ландшафтного подхода с применением геоинформационных систем (на примере бассейна реки Линда Нижегородской области) [электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15970> (дата обращения: 23.04.2024).
2. Гаврилко Д.Е., Жихарев В.С., Ручкин Д.С., Золотарева Т.В., Шурганова Г.В. Ветвистоусые ракообразные зарослей высших водных растений европейской части России (на примере притоков Горьковского и Чебоксарского водохранилищ) // Зоологический журнал. – 2020. – Т. 99. – № 2. – С. 146–156.
3. Коровчинский Н.М., Котов А.А., Бойкова О.С., Смирнов Н.Н. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. 1. Общая часть. – Москва: Товарищество научных изданий КМК. – 2021а. – 481 с.
4. Коровчинский Н.М., Котов А.А., Синева А.Ю., Неретина А.Н., Гарибян П.Г. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии. Т. 2. Систематическая часть. – Москва: Товарищество научных изданий КМК. – 2021б. – 544 с.
5. Шурганова Г.В., Золотарева Т.В., Жихарев В.С., Гаврилко Д.Е., Кудрин И.А., Старцева Н.А., ... & Шурганова Е.В. Экодиагностика разнотипных озер Нижегородской области на основе показателей видовой структуры зоопланктона // Самарский научный вестник. – 2021. – Т. 10. – № 2. – С. 116–123.
6. Шурганова Г.В., Кудрин И.А., Гаврилко Д.Е., Макеев И.С., Ильин М.Ю., Горьков, А.С. Зоопланктон малых водотоков урбанизированных территорий (на примере г. Нижний Новгород) // Вода: химия и экология. – 2015. – № 12(90). – С. 48–55.
7. Sinev A.Y., Gavrilko D.E. Examples of rare benthic Cladocera: two phytophilous species of Aloninae (Cladocera, Anomopoda, Chydoridae) from European Russia // Zoologicheskyy zhurnal. – 2020. - Vol. 99(11). – 1242–1257.

ИЗМЕНЕНИЕ ОБЛЕСЕННОСТИ МИКРОЛАНДШАФТОВ БОЛОТНЫХ МАССИВОВ ЗАПАДНОДВИНСКОГО ЛЕСОБОЛОТНОГО СТАЦИОНАРА

CHANGES IN AFFORESTATION OF MICROLANDSCAPES OF PEATLANDS MASSIFS OF THE WEST-DVINA FOREST-PEATLAND STATION

К.П. Егоров¹, М.А. Медведева¹, О.В. Галанина^{1,2,3}.

K.P. Egrov¹, M.A. Medvedeva¹, O.V. Galanina^{1,2,3}.

¹ Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Россия)

² Санкт-Петербургский государственный университет (г. Санкт-Петербург, Россия)

³ Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН (г. Санкт-Петербург, Россия)

email: 79066516829@yandex.ru

Торфяные болота и мелкоотторфованные заболоченные земли занимают более 20% территории Российской Федерации, главным образом на землях Государственного лесного фонда (Вомперский и др., 2005). Более половины болот покрыты деревьями, преимущественно редколесной или лесной растительностью. Верховые болота составляют около 20% общей площади болот в стране, причем более половины из них покрыты деревьями (Вомперский и др., 2005). На Европейской территории России облесенность верховых болот достигает 60-70% (Вомперский и др., 2011). Рост древостоя на болотах связан с понижением уровня болотных вод (Вомперский и др., 1988).

Цель работы заключалась в сравнении изменений облесенности болотных микроландшафтов на примере болот Западнодвинского лесоболотного стационара ИЛАН РАН (Тверская область). Известно, что в 1972-1973 гг. здесь было проведено экспериментальное лесосушение (Вомперский, Сиринов и Глухов, 1988). Объектами исследования были выбраны болотные массивы: Ламтевский Мох (не осушен), Большой Роговской Мох (частично осушен) и Усвятский Мох (полностью осушен).

Для объектов исследования было проведено сравнение облесенности, вычисленной на основе спутниковых снимков и полученной по наземным измерениям. Для сбора наземных данных было заложено 33 круговые пробные площади, на которых фиксировались следующие параметры: полнота древостоя (по трем точкам), для 5 средних деревьев измерялись диаметр и высота. Делались фотографии общего вида и вертикальные для глазомерной оценки сомкнутости крон.

Исследование также включало анализ спутниковых снимков Landsat различных поколений с использованием спектральных индексов. В

дальнейшем предпочтение было отдано зимней съемке так, как она минимизирует влияние напочвенного покрова, которое может быть особенно существенным при разреженном лесном покрове. Далее выполнялась неконтролируемая классификация с использованием методов итеративного минимального расстояния и восхождения на холм. Было выделено 5 классов с сомкнутостью крон 0-0,1; 0,2-0,3; 0,4-0,5; 0,6-0,7 и 0,8-1,0. Эти данные были использованы для классификации спутниковых снимков и оценки облесенности верховых болот (Егоров и др., 2023b).

На всех болотных массивах был отмечен рост облесенности, но эта тенденция наблюдается не для всех микроландшафтов. На объектах исследования были выделены следующие микроландшафты: грядово-озерковый комплекс (1), грядово-мочажинный комплекс (2), кустарничково-пушицево-сфагновый с редкой сосной (3), пушицево-кустарничково-сосново-сфагновый (4), сосняк сфагново-кустарничковый (облесенное кольцо) (5), пушицево-сфагновый и осоково-сфагновый безлесные (6), тростниково-крупнотравный и осоково-долгомошный лесные (7), сосняк кустарничково-сфагновый (8), сосняк долгомошно-кустарничковый (9), минеральные острова (10). Ниже представлено распределение микроландшафтов на болотных массивах (рис. 1). Нетрудно заметить, что болотные массивы Большой Роговской Мох и Ламтевский Мох имеют сходный набор микроландшафтов, за исключением грядово-озеркового комплекса, который представлен лишь на первом из упомянутых. Пространственная структура болота Усвятский Мох гораздо проще из-за его меньших размеров и проведенного осушения.

Оценка изменения облесенности микроландшафтов проводилась по данным 1996 и 2022 годов. Хотя в собранной библиотеке спутниковых

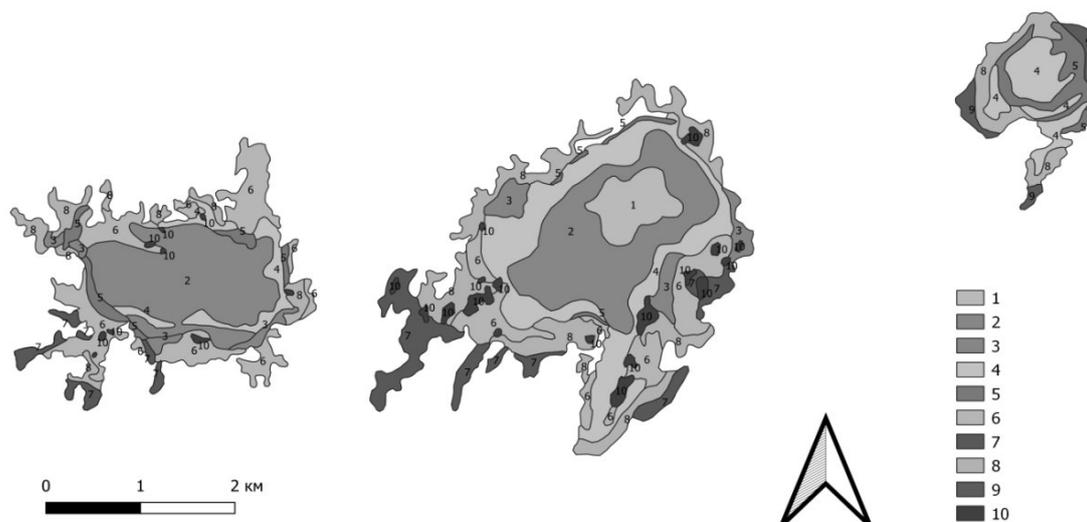


Рис. 1. Микрорандшафты болотных массивов Ламтевский Мох (слева), Большой Роговской Мох (в центре) и Усвятский Мох (справа)

снимков Landsat были данные и за более ранний период, 1996 год был выбран из-за более высокого пространственного разрешения. Важным фактором являлось то, что в 1999 году на болотном массиве Усвятский Мох произошёл пожар (Вомперский и др., 2007). За 20 лет древесный покров восстановился, что делает результаты исследования более объективными.

Ожидаемо полностью осушенный болотный массив Усвятский Мох показал увеличение площади, покрытой древостоем с высокой сомкнутостью крон. В начале периода исследования (1976 год) доля древостоя с низкой сомкнутостью крон (0-0,1) составляла 45%, однако к концу исследования это значение сократилось до всего 2-3% после проведения осушения. Таким образом, на данном болотном массиве минимальное количество участков сохраняет свои болотные характеристики. Эта тенденция характерна для всех микрорандшафтов (таблица 1). В таблице показаны изменения площади каждого класса на каждом присутствующем типе микрорандшафтов.

Таблица 1. Изменение площади каждого класса облесенности для микрорандшафтов болотного массива Усвятский Мох с 1996 по 2022 в %

Тип микрорандшафта	классы				
	1	2	3	4	5
4	-57	13	26	18	0
5	-16	-54	40	28	2
8	-9	-39	-1	28	21
9	-5	-19	-43	25	42

Изменение микрорандшафтов после пожара не учитывалось, но учеными, изучавшими данную проблему, был сделан следующий вы-

вод: положительные элементы микрорельефа с кустарничками и прикомлевыми буграми становятся потенциальными местами возникновения почвенно-торфяного пожара. Вероятность возникновения таких пожаров, предположительно, увеличивается с осушением болот. Поскольку влажность верхнего слоя почвы (0-5 см) в большей степени зависит от погодных условий, а не от глубины грунтовых вод, горючие свойства торфа в естественных и осушенных болотах в большинстве случаев схожи (Вомперский и др., 2007).

Увеличение облесенности характерно и для болотного массива Большой Роговской Мох. Наиболее выраженные изменения в плотности лесного покрова болота наблюдаются в его окраинных частях, при этом центральная часть остаётся достаточно обводненной (рис. 1 и таблица 2). Изменений облесенности грядово-мочажинного комплекса отмечено не было.

Таблица 2. Изменение площади каждого класса облесенности для микрорандшафтов болотного массива Большой Роговской Мох с 1996 по 2022 в %

Тип микрорандшафта	классы				
	1	2	3	4	5
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-5,7	4,1	1,3	0,3	0,0
3	-34,8	12,3	13,8	3,6	5,1
4	-43,5	14,0	18,4	6,5	4,6
5	-33,1	-24,9	23,7	34,2	0,0
6	-39,1	-0,3	4,4	18,4	16,6
7	-11,4	-4,9	-21,6	-37,2	75,0
8	-13,1	-22,3	-18,4	0,4	53,5
10	-25,9	-12,6	-14,3	7,5	45,4

Изучая изменения растительного покрова на болотном массиве Ламтевский Мох, мы наблюдаем активный рост деревьев в определенных микроландшафтах. Этот рост особенно заметен на окраинных участках, где произрастают сосняки тростниково-крупнотравные, осоково-долгомошные (7) и кустарничково-сфагновые (8). Интенсивное формирование древостоя также наблюдается на внутриболотных минеральных островах (10). В то же время, центральная часть болота остается стабильной и не подвержена значительным изменениям. В некоторых случаях в центральных микроландшафтах наблюдается уменьшение «лесных» классов (рис.1 и таблица 3).

Таблица 3. Изменение площади каждого класса облесенности для микроландшафтов болотного массива Ламтевский Мох с 1996 по 2022 в %

Тип микроландшафта	классы				
	1	2	3	4	5
2	2	0	0	-2	0
3	18	1	-1	-19	0
4	21	1	-2	-21	0
5	-23	2	13	5	2
6	-11	3	4	3	1
7	-23	-13	-2	11	26
8	-20	-12	-2	20	14
10	-15	8	5	-1	3

По итогам проведенной работы можно сделать вывод о том, что отмечается увеличение плотности лесного покрова во всех микроландшафтах периферийных частей болотных массивов: открытых пушицево-сфагновых, осоково-сфагновых, лесных тростниково-крупнотравных, осоково-долгомошных, сосняков кустарничково-сфагновых и долгомошно-кустарничковых, а также на минеральных островах. Облесенность окраинных комплексов с сосняками сфагново-кустарничковыми увеличилась, однако рост плотности древостоя из сосны обыкновенной в центральных частях массивов Большой Роговской Мох и Ламтевский Мох, где преобладают грядово-мочажинные и грядово-озерковые комплексы, был менее заметен. Полученные результаты требуют более подробного и широкомасштабного анализа, однако в целом они подтверждают гипотезу о росте плотности лесного покрова на верховых болотах южной тайги в последние десятилетия (Егоров и др., 2023a).

Также лесные экосистемы на осушенных болотах более уязвимы для низовых пожаров по сравнению с лесами на минеральных почвах, где почвенные пожары не возникают. При сгорании или повреждении камбиального слоя деревьев, хвой, тонкомера и корней даже при небольшом пожаре гибель продуктивных мелиорированных сосен приближается к 100% (Вомперский и др., 2007).

Работа проводилась при участии Российского научного фонда (проект 23-74-00067).

1. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Глухов А.И. (1988). Формирование и режим стока при гидроресомелиорации. Москва: Наука. 168 с.
2. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. (2005). Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия Российской академии наук. Серия географическая. № 5. С. 39-50.
3. Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. (2007). Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. № 6. С. 35-44.
4. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А. (2011). Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // Лесоведение. № 5. С. 3-11.
5. Егоров К.П., Медведева М.А., Галанина О.В., Сирин А.А. (2023a). Изменение облесенности верховых болот за последние десятилетия: некоторые данные (на примере объектов Западнодвинского лесоболотного стационара ИЛАН РАН, Тверская область) // Материалы конференции "XII Галкинские Чтения – Типы болот регионов России" (Санкт-Петербург, 3 февраля 2023 г.). Санкт-Петербург: БИН РАН. С. 71-73.
6. Егоров К.П., Медведева М.А., Галанина О.В., Сирин А.А. (2023b). Меняется ли облесенность верховых болот? Методика и предварительные результаты. Болота Северной Евразии: биосферные функции, разнообразие и управление // Тезисы докладов международного симпозиума (Петрозаводск, 25-28 сентября 2023 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 31-32.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ HCO_3^- и Ca^{2+} НА РОСТ СФАГНОВЫХ МХОВ IN VITRO

THE RESULTS OF EXPERIMENTS TO IDENTIFY THE EFFECT OF HCO_3^- and Ca^{2+} ON THE GROWTH OF SPHAGNUM MOSSES IN VITRO

Д.В. Зацаринная^{1,2}, М.В. Лыкова¹, С.А. Стренина¹, И.А. Альбекова¹

¹ Тульский государственный университет (г. Тула, Россия)

² Тульский областной краеведческий музей (ГУК ТО «Тульское музейное объединение») (г. Тула, Россия)

E-mail: visloguzova@mail.ru

В последнее время интерес к экологии сфагновых мхов значительно возрос (Зацаринная, Лыкова, 2022; Попов, Федосов, 2017; Попов, 2023; Vicherová et al, 2015, 2017). Во многом это связано с работами по восстановлению болот, что нередко предполагает искусственное заселение сфагновыми мхами вторично обводненных торфяников. Состав вод, используемых с этой целью, может быть различен. Поэтому для понимания того, какие характеристики питающих вод (рН, общая минерализация, содержание отдельных катионов и анионов) могут оказать пагубное воздействие на рост сфагнов, необходимо более подробное изучение данных вопросов. Кроме

того, сбор и накопление информации такого рода важны еще и потому, что по составу и состоянию сфагновых мхов дают оценку условиям, в которых они сформированы. В связи с этим, различными исследователями были организованы лабораторные опыты по выращиванию сфагновых мхов в растворах различных солей (Зацаринная, Лыкова, 2022, Koks et al, 2022).

В данной работе в качестве объектов были выбраны 4 вида мхов. Одна часть из них была собрана на болотах в зоне широколиственных лесов (Тульская область – ТО), другая на болотах средней тайги (респ. Карелия - РК) (табл. 1).

Таблица 1. Краткая характеристика местообитаний исследуемых мхов

Название вида	Регион (название болота)	рН	Общ. минерализация (мг/л)
<i>Sphagnum riparium</i>	ТО (б-та у пос. Озерный)/ РК (Денная ламба)	4,7-5,2 / 4,6-6,5	50-75 / 45-156
<i>Sphagnum fallax</i>	ТО (б-та у пос. Озерный)	4,2-5,2	8-62
<i>Sphagnum angustifolium</i>	РК (б-то Гипновое)	4,9	15
<i>Sphagnum divinum</i>	ТО (б-та у пос. Озерный)	4,2-4,8	8-62

В таблице 1 приводятся краткие характеристики воды в естественных местообитаниях исследуемых мхов (Зацаринная, 2015; Mironov, 2024). Для *Sphagnum angustifolium* нами не было обнаружено опубликованной информации, поэтому оперировали однократно измеренными данными.

Всего в опыте было задействовано 520 растений мхов, отобранных в естественных ус-

ловиях, которые были обрезаны до одинаковой длины и помещены в прозрачные стаканчики с питательными водными растворами. *Sphagnum fallax* содержался в растворах с ионами Ca^{2+} и HCO_3^- в различных концентрациях, а также в родниковой воде, характеризующейся повышенным содержанием этих ионов (табл. 2), и болотной воде, остальные мхи – только в родниковой воде.

Таблица 2. Варианты растворов для выращивания *Sphagnum fallax*

Название иона, по которому определяли концентрацию (соль)	Концентрация 1, мг/л	Концентрация 2, мг/л	Концентрация 3, мг/л	Родниковая вода мг/л
$\text{HCO}_3^- (\text{NaHCO}_3)$	10	40	60	338
$\text{Ca}^{2+} (\text{Ca}(\text{NO}_3)_2)$	5	15	20	120

Важным нюансом является то, что в одном из опытов со *Sphagnum fallax* в каждый стаканчик помещали по 10 растений. В остальных вариантах в стаканчик высаживали, в среднем, по 30-40 растений, что приближено к сложению дерновинок в естественных условиях. Стаканчики со мхами были размещены в лаборатории в условиях естественного освещения при комнатной температуре (21–230 С) и накрыты прозрачными полиэтиленовыми пакетами для снижения испарения. Продолжительность эксперимента составила 3 месяца, в течение которых каждые 2 недели отмечали визуальные изменения в состоянии мхов. Раз в две недели производили замену растворов на свежеприготовленные. Для растворов, в которых содержался *Sphagnum fallax* перед каждой заменой измеряли pH и общую минерализацию с помощью портативного pH-кондуктометра Combo Hanna HI 98129. По завершению опытов были измерены приросты мхов. В данной работе приводятся результаты нескольких опытов, организованных в 2021–2023 годах.

Результаты выращивания *Sphagnum fallax* в растворах солей приведены на рис.1.А. Для

первоначального варианта с малым количеством растений, помещенных в стаканы, негативное влияние HCO_3^- довольно заметно, и по мере увеличения концентрации пагубное воздействие возрастает, что характеризуется менее интенсивными приростами. В опыте, где количество растений в стаканчиках было увеличено до 40 негативный эффект заметно снижается и различия между приростами мхов, выращенных в болотной воде и в солевых растворах уже не имеет резких отличий. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что групповое произрастание мхов обеспечивает устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов.

Как показал данный опыт, используемые концентрации Ca^{2+} практически не снизили прирост *Sphagnum fallax* в сравнении с приростом в болотной воде, а в некоторых случаях, наоборот, способствовали более интенсивному росту мхов, хотя содержание данного катиона в растворах превысило в несколько раз его естественное содержание в болотной воде (3 мг/л). Это подтверждает тот факт, что *Sphagnum fallax* характеризуется широкой экологической амплитудой.

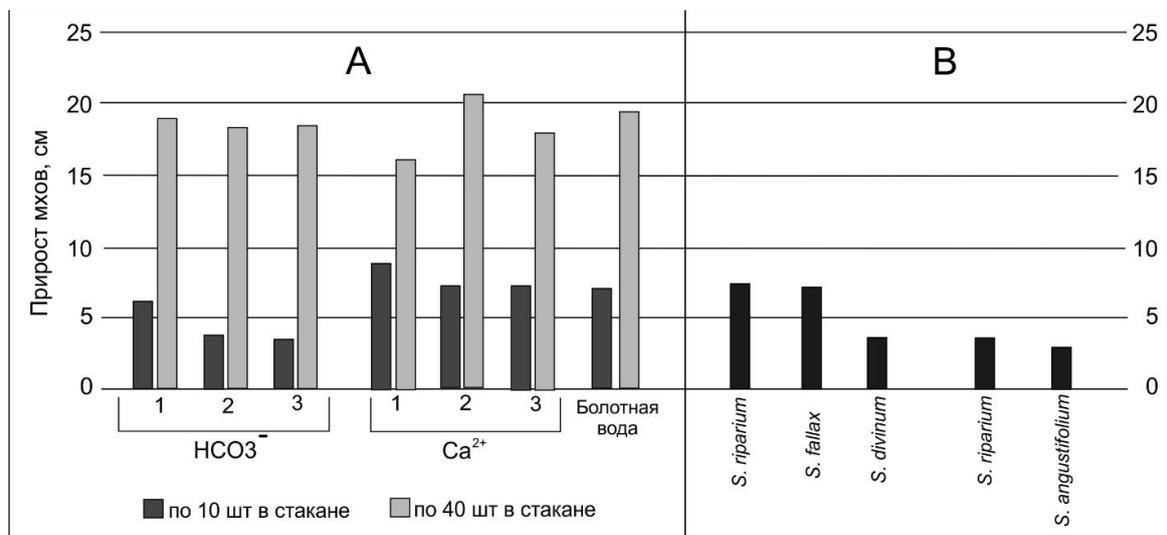


Рис. 1. Приросты сфагновых мхов:

А – приросты *Sphagnum fallax* в растворах солей (по оси x номерами показаны концентрации растворов, см. табл. 2)
 В – приросты сфагновых мхов в родниковой воде.

Другим вариантом воздействия на сфагновые мхи было их содержание в родниковой воде, которая отличается по pH (7,3), минерализации (676 мг/л) и содержанию HCO_3^- и Ca^{2+} (табл. 2) от болотной воды в естественных условиях произрастания (табл. 1), а также от рассмотренных ранее искусственных растворов. Приросты разных видов мхов после содержания в родниковой воде представлены на рисунке 1.В.

Нужно отметить, что несмотря на столь высокое содержание HCO_3^- и Ca^{2+} исследуемые мхи

не погибли за 3 месяца эксперимента, хотя их приросты были существенно ниже, чем в искусственных растворах, речь о которых шла выше.

Sphagnum riparium и *Sphagnum fallax*, собранные на болотах Тульской области, по истечению трех месяцев показали более интенсивный прирост по сравнению со *Sphagnum divinum*. Это можно объяснить лучшей их приспособленностью к более трофным условиям среды. Приросты *Sphagnum riparium* и *Sphagnum angustifolium*, привезенных из республики Карелия, оказались

ниже, чем у мхов со схожей экологией, собранных на территории Тульской области (рис. 1.В), что, вероятно, свидетельствует о роли исходных биотопов в формировании устойчивости.

Кроме того, на примере *Sphagnum fallax* было проанализировано, могут ли сами расте-

ния изменять характеристики водных растворов, в которых произрастают (рис.2). Полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемый вид мха существенно преобразовал химические характеристики растворов, в которых выращивался.

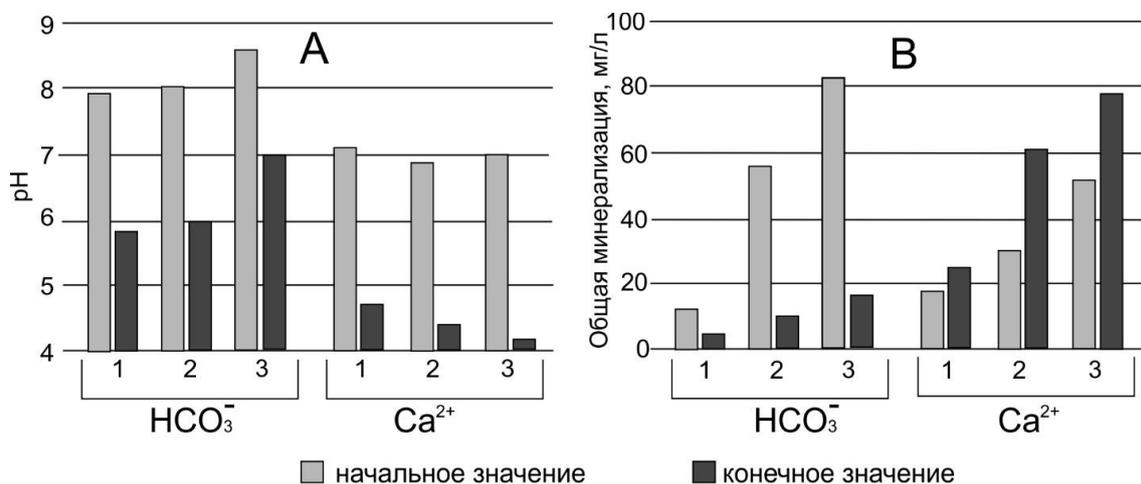


Рис. 2. Изменение характеристик растворов солей *Sphagnum fallax*:

А – изменение pH; В – изменение минерализации (по оси x номерами показаны концентрации растворов, см. табл. 2)

Так, значения pH снизились во всех растворах, причем в растворах с Ca^{2+} разница между начальными и конечными значениями данного параметра заметно выше, чем в растворах с HCO_3^- (рис. 2.А). Что касается изменения общей минерализации, то для бикарбоната отмечено снижение значений данного параметра, а для кальция – напротив их увеличение (рис. 2.В).

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что мхи, находясь в условиях

отличных от естественных, преобразуют их, изменяя pH и общую минерализацию растворов.

В заключении хотелось бы отметить, что данные исследования будут нами продолжены, поскольку они важны для понимания экологии разных видов сфагновых мхов. Накопления фактического материала такого рода необходимо для более эффективной разработки мер по охране или использованию этих растений для целей восстановления болот.

1. Зацаринная Д.В. Экологические особенности и растительность карстовых болот зоны широколиственных лесов (на примере Тульской области). Дис. ... канд.биол. наук. Москва. 2015.173 с
2. Зацаринная Д. В., Лыкова М. В. Влияние некоторых солей на рост *Sphagnum fallax* // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, N. 4, 2022, С. 42-48. doi: 10.24412/2071-6176-2022-4-42-48
3. Попов С.Ю. Ценолитическое распределение и экологические предпочтения сфагновых мхов на юге лесной зоны Европейской России // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки N. 2, 2023. С. 117-150. DOI: 10.24412/2071-6176-2023-2-116-150
4. Попов С.Ю., Федосов В.Э. Ценолитическое распределение и экологические предпочтения сфагновых мхов (*Sphagnaceae*) в северной тайге европейской России (Пинежский заповедник, Архангельская область) // Труды Карельского научного центра РАН. №9. 2017. С. 3–29.
5. Koks A. Y.W., Fritz C., Smolders A.J. P., Rehlmeier K., Elzenga J. T. M., Krosse S., Lamers L. P. M., G. van Dijk Sphagnum bleaching: Bicarbonate 'toxicity' and tolerance for seven Sphagnum species // Plant Biol (Stuttg). 2022 Aug; 24(5):780-790. doi: 10.1111/plb.13423.
6. Mironov V.L. Geomagnetic anomaly in the growth response of peat moss *Sphagnum riparium* to temperature. Plants. 2024; 13(1):48. https://doi.org/10.3390/plants13010048
7. Vicherová E., Hájek M., Hájek T. Calcium intolerance of fen mosses: Physiological evidence, effects of nutrient availability and successional drivers // Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. V. 17, Issue 5, 2015. P. 347-359. https://doi.org/10.1016/j.ppees.2015.06.005.
8. Vicherová E., Hájek M., Šmilauer P., Hájek T. Sphagnum establishment in alkaline fens: Importance of weather and water chemistry // Science of The Total Environment, V.580, 2017. P. 1429-1438. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.109.

РАЗНООБРАЗИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ НА ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ МАЛЫХ БОЛОТАХ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ КАРЕЛИИ

DIVERSITY OF PLANT COMMUNITIES IN NATURAL AND TRANSFORMED SMALL MIRE IN A MIDDLE TAIGA KARELIA

Л.В. Канцерова, П. А. Игнашов

L.V. Kantserova, P.A. Ignashov

ФГБУН Институт биологии Карельского научного центра РАН (г. Петрозаводск, Россия)

e-mail: Kancerova.L@mail.ru

В Карелии процессу трансформации растительного покрова подвергаются многие экосистемы, в том числе, и болотные. Одним из факторов, оказывающим влияние на болота, является нарушение их гидрологического режима в результате строительства дорог и других линейных сооружений, что приводит, особенно на пониженных участках рельефа, к их переувлажнению и подтоплению. В первую очередь, это отражается на изменении растительности. Данным направлением занимались многочисленные исследователи различных регионов России и бывших республик СССР (Парфенов и др., 1985; Миронов А.А., 1997; Миляева и др., 2012; Миляева, Вишнякова, 2014; Миронычева-Токарева и др., 2017; Михайлова и др., 2017; Полкошникова О.В., 1982; Филиппов и др., 2011). На территории Карелии с 2008 года ведутся исследования по изучению флоры и растительности на естественных и трансформированных малых болотах, площадью менее 100 га (Игнашов, Кузнецов, 2022 а, б; Канцерова, 2021; Kantserova, 2022).

В качестве объектов исследования были выбраны малые болота в естественном и транс-

формированном состоянии Прионежского, Пряжинского, Кондопожского и Пудожского районов Карелии. Геоботанические описания проводились на временных пробных площадях (10×10 м) или в пределах естественного контура фитоценоза. На болотных участках с комплексным строением растительного покрова описания выполнялись на каждом элементе микрорельефа. Для каждого сообщества отмечалось проективное покрытие видов основных ярусов в процентах (Корчагин, 1964). Всего выполнено 128 геоботанических описаний болотной и гигрофильной травяной растительности.

Классификация растительности естественных и трансформированных малых болот построена на основе тополого-экологического метода (Кузнецов, 2005), где ассоциации выделены по доминирующим и содоминирующим видам и представленности эколого-ценотических групп (ЭЦГ) видов, а также по положению в микрорельефе. Всего на естественных и трансформированных малых болотах Карелии выделено 12 ассоциаций (таблица).

Таблица. Ассоциации растительных сообществ трансформированных и естественных болот

Класс	Ассоциация	Естественные	Придорожные
Омбротрофные	1. <i>Eriophorum vaginatum</i> - <i>Sphagnum balticum</i>	+	–
	2. <i>Scheuchzeria palustris</i> - <i>Sphagnum majus</i>	+	–
	3. <i>Rhynchospora alba</i> - <i>Sphagnum majus</i>	+	–
	4. <i>Scheuchzeria palustris</i> - <i>Hepaticae</i>	+	–
Олиготрофные	5. <i>Carex rostrata</i> - <i>Sphagnum fallax</i>	+	+
Мезотрофные	6. <i>Betula pubescens</i> - <i>Menyanthes trifoliata</i>	+	–
	7. <i>Carex rostrata</i> - <i>Sphagnum riparium</i>	+	+
	8. <i>Carex rhynchophysa</i> - <i>Sphagnum squarrosum</i>	–	+
Евтрофные	9. <i>Equisetum fluviatile</i> - <i>Comarum palustris</i>	+	+
	10. <i>Carex omskiana</i> - <i>Comarum palustris</i>	+	–
	11. <i>Carex lasiocarpa</i> - <i>Sphagnum warnstorffii</i>	+	+
	12. <i>Carex livida</i> - <i>Menyanthes trifoliata</i>	+	–

В исследованных сообществах обнаружено 195 видов высших растений (из них 148 видов сосудистых растений и 47 видов мхов). Во флоре трансформированных малых болот отсутствует ряд видов типичных для болот Карелии: *Scheuchzeria palustris*, *Carex pauciflora*, *Drosera anglica* и другие, и наоборот присутствуют не характерных для естественных болот виды: *Ptarmica vulgaris*, *Rhinanthus minor*, *Vicia cracca*, *Trifolium pratense* и другие.

На трансформированных малых болотах не обнаружены типичные для естественных верховых болот Карелии омбротрофные сообщества ковров и мочажин (ассоциации 1-4). Поскольку для формирования верховой стадии болота требуются длительное время.

Растительные сообщества встречающиеся на трансформированных и естественных болотах принадлежат к минератрофным ассоциациям (5, 7, 9, 11). Эти ассоциации приурочены к местообитаниям со схожими условиями – высокой обводненностью грунтовыми, аллювиальными и делювиальными водами со средней степенью минерализации.

Выделенная на трансформированных участках ассоциация *Carex rhynchophysa*-*Sphagnum squarrosum* не была встречена на естественных болотах, возможно, это связано с тем, что сообщества данной ассоциации встречаются на мелкозалежных торфах (с глубиной торфа 20-30 см). Данные сообщества образовались вследствие строительства автомобильной дороги и процесс торфообразования в них только начался (Канцерова, 2012).

Работа выполнена по Госзаданию Института биологии КарНЦ РАН: FMEN-2022-0008 № 122031700449-3.

1. Игнашов П. А., Кузнецов О. Л. 2022. Флора малых болот среднетаежной Карелии и их роль в сохранении биоразнообразия // Ботанический журнал. №7. С. 652–671. DOI: 10.31857/S0006813622070055
2. Игнашов П. А., Кузнецов О. Л. 2022. Применение экологических шкал Элленберга при изучении флоры и растительности малых болот Карелии // Тр. КарНЦ РАН. №8. С. 114–122. doi: 10.17076/eco1726
3. Канцерова Л.В. 2012. Разнообразие и сукцессии растительных сообществ на трансформированных придорожных участках Карелии. Тр. КарНЦ РАН. Выпуск 13. С. 48–55.
4. Канцерова Л.В. 2021. Разнообразие и динамика растительности подтопленных и болотных участков вдоль автомобильных дорог Карелии // Материалы Шестого Международного полевого симпозиума «Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее». (Ханты-Мансийск, 28 июня-8 июля 2021 г.) Томск, С. 202–204.
5. Корчагин А.А. 1964. Видовой состав растительных сообществ и методы его изучения / ред. Е. М. Лавренко и А. А. Корчагина. М.–Л.: АН СССР. Т. 3. С. 39–62.
6. Кузнецов О.Л. 2005. Тополого-экологическая классификация растительности болот Карелии (омбротрофные и олиготрофные сообщества) // Тр. КарНЦ РАН. Петрозаводск, Вып. 8. Биоразнообразие, динамика и ресурсы болотных экосистем восточной Фенноскандии. С. 15–46.
7. Миляева Е.В., Махатков И.Д., Ермолов Ю.В., Кирпотин С.Н. 2012. Развитие подтоплений вдоль насыпных дорог в условиях лесотундры Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. № 365. С. 206–219.
8. Миляева Е.В., Вишнякова Е.К. 2014. Сукцессии растительности болотных экосистем при изменении гидрологического режима. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. Т. 2. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: Материалы X Международного научного конгресса. (Новосибирск, 8-18 апреля 2014 г.). Новосибирск: СГГА, С. 161–165.
9. Миронов А.А. 1997. Влияние строительства нефтепромысловых дорог на лесные и болотные биогеоценозы // Проектирование, строительство, ремонт и содержание транспортных сооружений в условиях Сибири. Томск, С. 20–25.
10. Миронычева-Токарева Н.П., Михайлова Е.В., Вишнякова Е.К. 2017. Трансформация растительного покрова болотных экосистем при строительстве дорожного полотна (на примере таежной зоны Западной Сибири) // Вестник Оренбургского Государственного университета. № 12 (212). С. 55–59.
11. Михайлова Е.В., Махатков И.Д., Миронычева-Токарева Н.П., Коронатова Н.Г. 2017. Антропогенная нагрузка на тундровые экосистемы при прокладке линейных сооружений / Интерэкспо Гео-Сибирь-2017: XIII Междунар. науч. конгр., 17-21 апр. 2017 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанц. методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, Т. 2. С. 175–179.
12. Парфенов В.И., Ким Г.А., Рыковский Г.Ф. 1982. Антропогенные изменения границ ареалов, динамика и растительность под влиянием прокладки транспортных путей // Антропогенные изменения флоры и растительности Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1985 С. 193 – 200.
13. Полкошников О.В. Влияние автомобильных дорог на растительность верховых болот Среднего Приобья. М., 24 с.
14. Филиппов И.В., Филиппова Н.В., Лапшина Е.Д. 2011. Влияние дорожной сети на растительность болот природного парка «Кондинские озера» // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы Третьего Междунар. полевого симп. (Ханты-Мансийск, 27 июня -5 июля 2011 г.). Новосибирск, С. 206–207.
15. Kantserova L.V. 2022. Vegetation diversity in inundated and paludal sites along motor roads in Karelia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1093. 012030. doi:10.1088/17551315/1093/1/012030

СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ МЕРЗЛОГО КРУПНОБУГРИСТОГО БОЛОТНОГО КОМПЛЕКСА НА СЕВЕРЕ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

VEGETATION STATUS OF THE FROZEN LARGE-HUMMOCKY BOG COMPLEX ON THE NORTH OF THE KOLA PENINSULA IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

Е.М. Копцева

Е.М. Koptseva

Санкт-Петербургский государственный университет (г. Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: e.koptseva@spbu.ru

В связи с нарастающими тенденциями потепления климата в некоторых субарктических регионах дальнейшее устойчивое существование мерзлых торфоминеральных болот все чаще ставится под сомнение (Zuidhoff, 2003; Zuidhoff, Kolstrup, 2005; Шишконокова и др., 2016). Реликтовые участки крупнобугристых мерзлых болот Кольского полуострова, Скандинавии, а также Канады в настоящее время характеризуются проявлением разнообразных регрессивных процессов, которые могут повлиять в том числе на изменение запасов углерода в экосистемах, однако масштабы этих изменений пока еще мало изучены (Vargas, 2010; Pelletier et al., 2017). В этой связи наблюдения за сукцессиями растительности участков мерзлых болот представляют научный интерес для дальнейшего понимания изменяя экосистемных функций растительности при потеплении климата, что особенно ярко проявляется в наиболее теплом регионе Субарктики – Кольском Севере.

Мониторинг состояния мерзлого участка болота на территории Мурманской области в бассейне реки Менникайоки близ ГПЗ «Пасвик» (координаты участка 69°24'01.0»N 29°53'00.1»E) начат в 2007 году. Обследованный участок крупнобугристого болота характеризуется комплексной растительностью с ерниковыми травяно-кустарничково-мохово-лишайниковыми буграми и пушицево-осоково-сфагновыми мочажинами.

На болоте активно проявляются регрессивные процессы, связанные с разрушением высоких мерзлотных лишайниковых гряд и бугров. Непрямой ординационный анализ 44 геоботанических описаний позволил выделить два ведущих, организующих растительность болотного комплекса фактора – это обводненность и трофность местообитаний.

Самые крупные мерзлые гряды на болоте имеют высоту до 1.5 м и являются самыми сухими.

Поверхность таких гряд зачастую изрыта довольно глубокими трещинами, в которых обнажается сухой торф, а в трещинах боковых поверхностей гряд стоит талая вода. Растительный покров таких гряд представлен лишайниковыми (*Cladonia rangiferina* (L.) F. H. Wigg., *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar et Vězda, *Flavocetraria nivalis* (L.) Kärnefelt et A. Thell, *Flavocetraria cucullata* (Bellardi) Kärnefelt et A. Thell, и др.) сообществами с незначительным участием кустарничков (*Betula nana* L., *Empetrum hermaphroditum* Hagerup, *Ledum palustre* L. и др.). Живые зеленые и сфагновые мхи отсутствуют, торфонакопление не происходит.

Краевые (хвостовые) части гряд со временем оползают и фрагментируются на более влажные низкие кочки и бугорки в начале с сохранением остаточной мерзлоты и смене на кустарничково-моховые сообщества, с небольшим участием лишайников.

Центральные части бугров и гряд вследствие вытаивания по глубоким трещинам мерзлой основы, проседают и практически погружаются в окружающие мочажины, превращаясь в озерки. При этом растительность закономерно сменяется на гидрофильную с доминированием *Carex rostrata* Stokes и *Sphagnum lindbergii* Schimp. В дальнейшем можно прогнозировать интенсивное зарастание образовавшихся обводненных термокарстовых воронок, что наблюдали на болотах Западной Сибири (Шишконокова и др., 2016).

Регрессивные процессы в мочажинах связаны с усилением обводненности из-за вытаивания мерзлоты бугров и гряд. Это приводит к формированию наиболее топких мочажин с фрагментами обнаженного денудированного торфа, покрытого коркой водорослей и печеночников с преобладанием *Mylia anomala* (Hook.) Gray. Гидрофильная высшая растительность здесь редкая. Обычно по краям таких «черных» топей-мочажин изредка

произрастают *Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum riparium* Ångstr. и *Scorpidium revolvens* (Sw. ex anon.) Rubers.

Среди причин, приводящих к деградации ландшафтов мерзлых болот российские и зарубежные исследователи называют, как абиотические факторы, такие как потепление климата или изменение гидрологии местности, так и сукцессии самой растительности, в частности разрастание крупных кустарничковых форм багульника и карликовой березки (Zuidhoff, Kolstrup, 2005; Шишконокова и др., 2016). По данным ближайшей метеостанции (п. Янискоски: http://www.pogodaiklimat.ru/history/22101_2.htm) до начала XXI века в регионе сохранялась отрицательная среднеголетняя годовая температура воздуха, которая составляла -0.8°C . С начала 2000-х годов данный показатель превысил критические для существования мерзлых болотных форм рельефа нулевые отметки и сейчас составляет $+0.3^{\circ}\text{C}$ за прошедшие четверть века. Аналогично, произошло по-

вышение среднеголетнего значения годовой суммы осадков с 488 мм во второй половине прошлого века до 534 мм в текущем столетии.

Исследования показали, что существует взаимосвязь между стадией развития болотных форм крупнобугристого рельефа и гидрологией болота, а также видовым составом и структурой растительности, глубиной снежного покрова и толщиной сезонно талого слоя (Zuidhoff, Kolstrup, 2005). Повышение общей обводненности наряду с деятельностью ветра, дополнительно иссушающего поверхность высоких гряд, также являются драйверами деградации ландшафтов мерзлых болот (Копцева и др., 2016). Поскольку формирования новых мерзлотных форм рельефа на болоте отмечено не было, то наиболее вероятным результатом трансформации мерзлых болот на Кольском Севере станет формирование на их месте грядово-мочажинных болот с доминированием кустарничково-моховых ассоциаций, характерных для более южных регионов.

Автор выражает глубокую признательность Н.Ю. Нацваладзе, Е.Н. Журавлевой и И.Ю. Новоселовой за помощь в сборе полевых данных.

1. Копцева Е. М., Нацваладзе Н. Ю., Журавлева Е. Н. 2016. Трансформация растительности крупнобугристого болота на Кольском полуострове под влиянием климатических изменений. Бот. журн. Т. 101. № 5. С. 537-547.
2. Шишконокова Е. А., Аветов Н. А., Березина Н. А., Толпышева Т. Ю., Шведчикова Н. К. 2016. Проявление регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ-Югра). Бюл. МОИП. Отд. Биол. Т.121. Вып. 3. С. 39-50.
3. Barcan V. Sh. 2010. Stability of palsa at the southern margin of its distribution on the Kola Peninsula. Polar Science. 19. V. 4. Iss. 3: 489–495.
4. Pelletier, Nicolas et al. "Influence of Holocene permafrost aggradation and thaw on the paleoecology and carbon storage of a peatland complex in northwestern Canada." The Holocene 27 (2017): 1391 - 1405.
5. Zuidhoff, F. S. 2003. Physical properties of the surface peat layer and the influence on thermal conditions during the development of palsas. Permafrost: 1313-1317.
6. Zuidhoff F.S, Kolstrup E. 2005. Palsa development and associated vegetation in northern Sweden. Arct Antarct Alp Res. Vol. 37(1):49-60.
7. Электронный веб-ресурс: http://www.pogodaiklimat.ru/history/22101_2.htm

ДИНАМИКА ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА И ПРОДУКЦИИ СФАГНОВЫХ МХОВ НА МЕЗОТРОФНЫХ БОЛОТАХ ПРИАМУРЬЯ

DYNAMICS OF ANNUAL REGROWTH AND PRODUCTION OF SPHAGNUM MOSSES ON THE PRYAMURIE' MESOTROPHIC BOGS

В. А. Купцова
V. A. Kuptsova

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (г. Хабаровск, Россия)
Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН (г. Хабаровск, Россия)
e-mail: victoria@ivep.as.khb.ru

В экосистемах мезотрофных болот сфагновые мхи Приамурья являются важнейшими продуцентами и доминантами растительного покрова, поэтому изучение параметров их роста и продукции является важным аспектом в изучении их биологии.

Для настоящего исследования были выбраны виды сфагновых мхов наиболее распространенные, доминирующие в растительном покрове мезотрофных болот Приамурья: *Sphagnum divinum* Flatberg & K. Hassel и *S. fuscum* (Schrimp.) Klinggr.

Исследования проводились автором с целью изучения динамики влияния климатических факторов на линейный прирост сфагновых мхов на болотах в междуречье рр. Хор и Кия (47°47' с.ш., 135°40' в.д.) в 2005–2019 гг. и рр. Малые Чирки, Пискуновка (48°12' с. ш., 135°07' в. д.) в 2006–2023 гг. Район исследований относится к северной подзоне хвойно-широколиственных лесов. По классификации Ю. С. Прозорова (1985) фитоценозы, в которых проводились исследования, принадлежат к мезотрофному древесно-сфагновому смешанного питания типу биогеоценозов лиственничной кустарничково-сфагновой группе биогеоценозов. Фитоценозы этого типа встречаются практически повсеместно на относительно дренированных участках первой надпойменной террасы, на плоской и слабонаклонной поверхности второй и более террас на территории Среднеамурской низменности. Помимо атмосферных осадков кустарничково-сфагновые лиственничники увлажняются поверхностно-сточными и делювиальными водами.

Линейный прирост сфагновых мхов измеряли классическим методом колышков (Слито, 1970). Для измерения было заложено по 10 площадок на каждом болотном массиве. На каждой площадке устанавливалось по 5 колышков на каждый вид мха. Измерения прироста проводили в конце сентября–начале октября.

Годичную продукцию каждого вида сфагновых мхов определяли как произведение абсо-

лютно сухой массы среднего прироста одного растения на количество растений на единице площади. Полученные данные статистически обрабатывались в программе StatSoft STATISTICA 10 и Microsoft Office Excel 2010.

Климатические условия исследуемого района отличаются неравномерным выпадением осадков. При общем среднегодовом количестве около 600 мм основная часть приходится на вторую половину лета. Продолжительность вегетационного периода составляет около 150 дней, при этом вегетация растений начинается во второй декаде апреля и продолжается до конца сентября–начала октября. Сумма температур за вегетационный период составляет порядка 2700–3000°C, а эффективных температур (выше 10°C) 2500° (Петров и др., 2000). За исследованный период в Приамурье самым засушливым был 2008 г. с годовой суммой осадков 413 и 422 мм, а в междуречье рр. Пискуновка, Малые Чирки и рр. Хор и Кия, соответственно (рис.1). В междуречье рр. Хор, Кия дождливыми были 2010 (957 мм), 2011 (906 мм), 2015 (909 мм) и 2019 (1003 мм) годы, а в междуречье рр. Пискуновка, Малые Чирки–2009 (840 мм), 2011 (803 мм), 2016 (810 мм), 2019 (849 мм) и 2022 г. (854 мм).

Исследуемые сфагновые мхи *Sphagnum fuscum* и *S. divinum* занимают повышенные элементы микрорельефа, образуют плотные дернины и способны выдерживать значительное и продолжительное пересыхание.

Согласно литературным данным на линейный прирост сфагновых мхов оказывает множество природных факторов (количество осадков, уровень болотных вод, температура, затененность, трофность местообитания и др.) (Hayward, Clymo, 1983; Грабовик, 2002; Gunnarsson, 2005; Breeuwer et al., 2008; Loisel et al., 2012; Косых и др., 2017; Mironov et al., 2018, 2020; Begtsson et al., 2020; Filippova et al., 2023). На мезотрофных болотах Приамурья линейный прирост

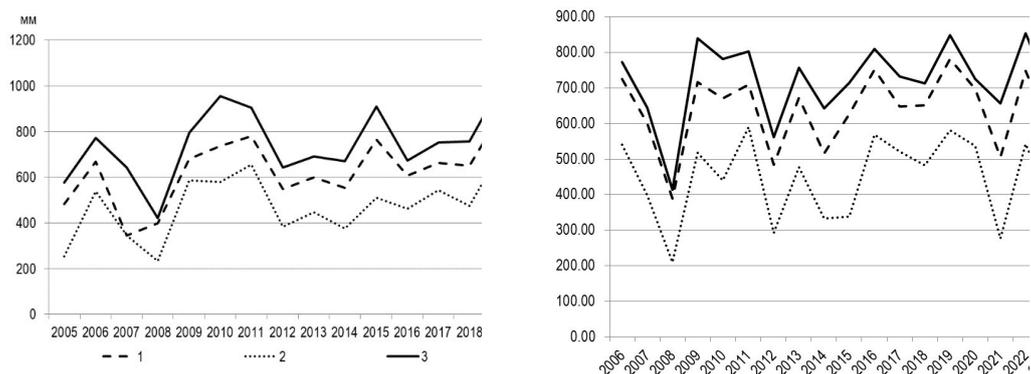


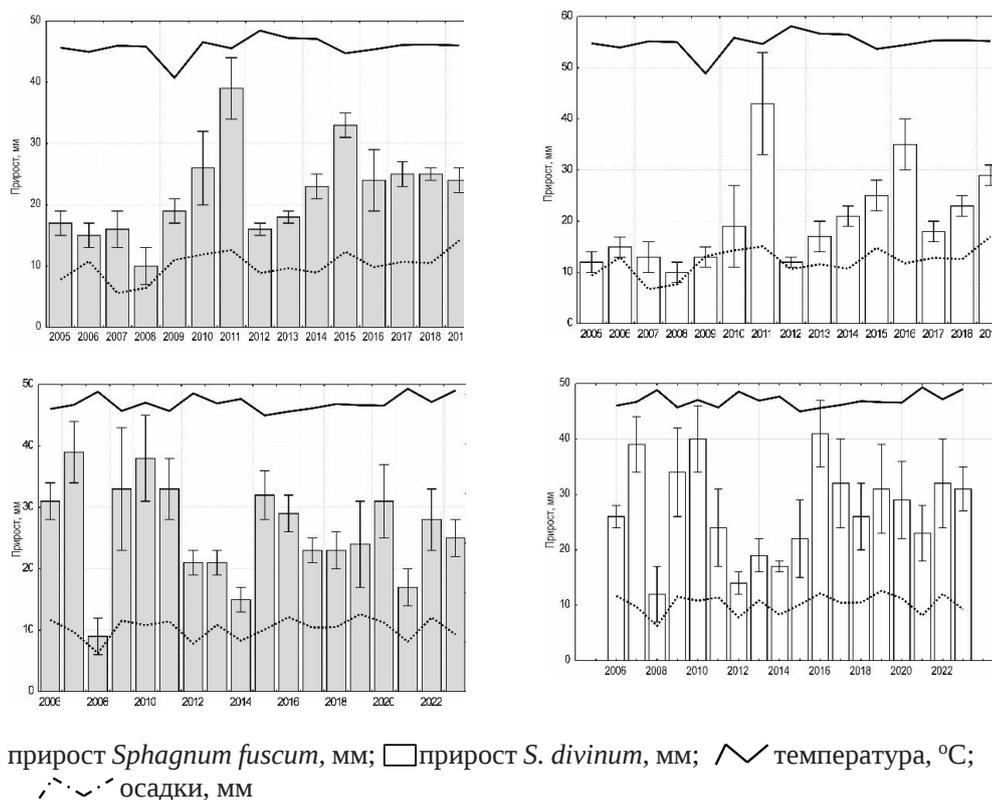
Рис. 1. Сумма осадков за вегетационный период (1), за июнь–сентябрь (2), за год (3) в районах исследования: А. междуречье рр. Хор и Кия; Б. междуречье рр. Пискуновка, Малые Чирки

Sphagnum fuscum за период исследований изменялся от 9 до 39 мм/год, а прирост *S. divinum* – от 10 до 43 мм/год.

Средний годичный прирост *Sphagnum fuscum* за период исследований составил $22,0 \pm 4,1$ и $26,2 \pm 4,0$ мм/год на мезотрофных болотах Приамурья в междуречье рр. Хор, Кия и рр. Пискуновка, Малые Чирки, соответственно. Средний годичный прирост *S. divinum* на этих болотах составил $20,4 \pm 5,3$ и $27,1 \pm 4,1$ мм/год, соответственно. По данным литературного обзора Loisel et al. (2012) линейный прирост данных видов в разных регионах варьирует от 1 до 60 мм/год. Таким образом, полученные значения прироста *S. fuscum* и *S. divinum* на мезотрофных

болотах Приамурья находятся в пределах размаха мировых данных.

За период исследований выявлены существенные колебания линейного прироста в зависимости от метеорологических условий вегетационных периодов (рис.2). Минимальный прирост *S. fuscum* был зафиксирован в 2008 г. – 10 ± 3 и 9 ± 3 мм/год в междуречье рр. Хор, Кия и рр. Пискуновка, Малые Чирки, соответственно. Минимальный годичный прирост *S. divinum* был также отмечен в самом засушливом 2008 г. – 10 ± 3 и 12 ± 5 мм. Максимальные приросты были зафиксированы: в междуречье рр. Хор и Кия в 2011 г. *S. fuscum* 39 ± 5 мм/год и *S. divinum* 43 ± 10 мм/год (сумма осадков за вегетационный период/год – 780/906 мм).



■ прирост *Sphagnum fuscum*, мм; □ прирост *S. divinum*, мм; — температура, °C; ····· осадки, мм

Рис. 2. Годичный прирост *Sphagnum fuscum* и *S. divinum* на мезотрофных болотах Приамурья: А. междуречье рр. Кия, Хор; Б. междуречье рр. Малые Чирки и Пискуновка

Выявлена корреляция прироста *Sphagnum fuscum* и *S. divinum* с количеством осадков. Значимым фактором для годового прироста этих видов оказалась сумма осадков за вегетационный период. Коэффициент корреляции между приростом и осадками за вегетационный период у *S. fuscum* был $r = 0.6484$ ($p = 0.00004$), у *S. divinum* – 0.6180 ($p = 0.0001$). Зависимость прироста от осадков за июнь–сентябрь (лето) оказалась менее выраженной у *S. fuscum* $r = 0.5249$ ($p = 0.0017$) и $r = 0.5961$ ($p = 0.0003$) за год. Коэффициент корреляции между приростом *S. divinum* и летними осадками составил $r = 0.5196$ ($p = 0.0019$), а между приростом и осадками за год – $r = 0.5242$ ($p = 0.0017$). По нашим данным прирост *Sphagnum fuscum* по сравнению с *S. divinum* оказался более чувствительным к условиям увлажнения в отличие от Западной Сибири, что возможно объяснить более высокими летними температурами в Приамурье. Так, за исследованный период температура за июнь–сентябрь в районе исследования варьировала в диапазоне 17,1 до 19,4 °С, а в Западной Сибири по данным Н. П. Косых и др. (2017) среднелетняя (за июнь–сентябрь) не превышала 14,26 оС. На мезотрофных болотах Приамурья *S. fuscum* приурочен к наиболее высоким уровням микрорельефа в отличие от *S. divinum*. По нашим данным (междуречье рр. Пискуновка, Малые Чирки) в летние месяцы температура на поверхности сфагновой дернины может достигать 30 оС. При таких высоких летних температурах влага становится лимитирующим фактором особенно для *S. fuscum*.

Среднегодовая продукция за период наблюдений на мезотрофных болотах Приамурья *S. fuscum* составила 106 ± 13 г/м²·год, а *S. divinum* – 121 ± 20 г/м²·год. Весь период исследования продукция этих видов варьировала в широких пределах. Так, продукция *Sphagnum fuscum* изменялась от 37 до 193 г/м²·год, а *S. divinum* – от 48 до 266 г/м²·год. Минимальные значения продукции *S. fuscum* 37 и 43 г/м²·год были зафиксированы в засушливом 2008 г. на болотах в междуречье рр. Кия, Хор и рр. Пискуновка, Малые Чирки, соответственно. У *S. divinum* минимальные значения продукции в междуречье рр. Хор, Кия были 48 ± 10 г/м²·год (2005 г., осадки за вегетационный/летний период 483/253 мм). В междуречье рр. Пискуновка, Малые Чирки – 68 ± 6 г/м²·год (2014 г., осадки за вегетационный/летний период 515/333 мм). Эти данные продукции *S. divinum* близки к значениям его продукции в засушливом 2008 г. 51 ± 11 и 71 ± 16 г/м²·год. Сходство данных продукции *S. divinum* можно объяснить тем, что продукция кроме линейного прироста определяется также плотностью дернин сфагновых мхов, а в сухие периоды сфагновые мхи имеют более высокую плотность побегов на единицу площади, чем во влажные.

Таким образом, изучение многолетней динамики параметров роста сфагновых мхов в Приамурье подтверждает их зависимость от колебаний условий увлажнения. Определяющую роль для роста сфагновых мхов на мезотрофных болотах Приамурья играют осадки за вегетационный период.

1. Грабовик С. И. 2002. Динамика годового прироста у некоторых видов *Sphagnum* L. в различных комплексах болот Южной Карелии. Растительные ресурсы, 4: 62–68.
2. Косых Н.П., Коронатова Н.Г., Лапшина Е.Д., Филиппова Н.В., Вишнякова Е.К., Степанова В.А. 2017. Линейный прирост и продукция сфагновых мхов в средней тайге Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 8. № 1 (15): 3–13.
3. Петров Е.С., Новороцкий П.В., Леншин В.Т. 2000. Климат Хабаровского края и Еврейской автономной области. Владивосток; Хабаровск. 174 с.
4. Прозоров Ю. С. 1985. Закономерности развития, классификация и использование болотных биогеоценозов. М., Наука. 208 с.
5. Bengtsson F., Rydin H., Baltzer J.L., Bragazza L., Bu Z.J., Caporn S.J., Dorrepaal E., Flatberg K.I., Galanina O., Gałka M., Ganeva A. 2020. Environmental drivers of *Sphagnum* growth in peatlands across the Holarctic region. *Journal of Ecology*, 109(1): 417–431.
6. Breeuwer A., Heijmans M.M., Robroek B.J., Berendse F. 2008. The effect of temperature on growth and competition between *Sphagnum* species. *Oecologia*, 1(156): 155–167.
7. Clymo R. S. 1970. The growth of *Sphagnum*: method of measuring the growth of *Sphagnum*. *J. Ecol.* 58(1): 13–49.
8. Filippova N.V., Kosykh N.P., Filippov I.V., Niyazova A.V. 2023. Annual growth and primary production of sphagnum in raised bog Mukhrino (four-year observations: 2019–2022). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 14(1): 21–37.
9. Gunnarsson U. 2005. Global patterns of *Sphagnum* productivity. *Journal of Bryology*, 3(27): 269–279.
10. Hayward P. M., Clymo R. S. 1983. The growth of *Sphagnum*: experiments on, and some effects of light and water-table depth. *Journal of Ecology*, 71: 845–863.
11. Loisel, J., Gallego-Sala, A. V., & Yu, Z. 2012. Global-scale pattern of peatland *Sphagnum* growth driven by photosynthetically active radiation and growing season length. *Biogeosciences*, 9: 2737–2746.

12. Mironov V.L., Grabovik S.I., Ignashov P.A., Kantserova L.V. 2016. Geotropic curvature of Sphagnum: environmental features of their genesis and trial application for estimation shoot length increment. *Arctoa*, 25(2): 352–363.
13. Mironov V. L., Kondratev A.Y., Mironova A.V. 2020. Growth of Sphagnum is strongly rhythmic: contribution of the seasonal, circalunar and third components. *Physiologia Plantarum*, 168(4): 765–776.

КАТАЛОГ МЕСТООБИТАНИЙ БОЛОТ ВОСТОЧНОЕВРОПЕЙСКИХ ТУНДР

CATALOG OF MIRE HABITATS OF EAST EUROPEAN TUNDRA

И.А. Лавриненко, О.В. Лавриненко

I.A. Lavrinenko, O.V. Lavrinenko

Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН (г. Санкт-Петербург, Россия)

e-mail: lavrinenkoi@mail.ru, lavrino@mail.ru

Основой существования арктической биоты является наличие соответствующих местообитаний (биотопов) – фрагментов земной поверхности, жизненно важных в определенный период времени для биологического вида или сообщества. Учитывая многообразие типов местообитаний Российской Арктики, прежде всего, необходима их инвентаризация, предваряемая классификацией. В 2019 г. при поддержке гранта РНФ на примере восточноевропейских тундр были начаты работы по созданию каталога биотопов Арктики. Был учтен опыт европейских стран, которые на протяжении десятилетий реализуют ряд национальных и общеевропейских программ по охране местообитаний (Лавриненко, 2020). В отличие от европейских каталогов, в основу классификации нами положены местоположение биотопов на геоморфологическом профиле и их экологические характеристики (почвы, водный режим и др.). Категории местообитаний разного ранга диагностируются синтаксономическим составом растительности, который отражает своеобразие экологических особенностей биотопов. Мелкоконтурность и мозаичность тундровых ландшафтов приводит к тому, что на карте даже в крупном масштабе приходится выделять не отдельные фитоценозы, а их комбинации – территориальные единицы растительности (ТЕР), которые отражают особенности распределения и результат взаимодействия экологических факторов в пределах местообитаний. Для диагностики биотопов разработаны типологическая схема и номенклатура ТЕР (Лавриненко, 2020, 2021). В основу последней положена эколого-флористическая классификация, в традициях которой опубликован чек-лист синтаксонов Российской Арктики (Матвеева, Лавриненко, 2021).

На самом высоком уровне выделены 4 группы местообитаний, приуроченных к крупным элементам ландшафта (наземные) и морской акватории, которые могут присутствовать в разных природных зонах: А – местообитания водораздельных поверхностей, В – долины во-

дотоков с пойменным режимом, С – приморские местообитания, D – морские местообитания, включая эстуарии. Для отражения зонального положения биотопов к индексу первого уровня добавлена буква: а – полярные пустыни, b – тундры, с – лесотундра и т.д. Биотопы категорий второго уровня (Ab1, ..., Cb3) различаются по положению на обобщенном геоморфологическом профиле – от наиболее высоких позиций (Ab1 – элювиальные местоположения) до самых низких (Cb3 – аккумулятивные морские террасы). При выделении категорий биотопов третьего уровня, наряду с положением на профиле, учтены особенности субстрата. Большинство групп первого–третьего уровней хорошо различаются на материалах ДЗЗ, что открывает широкие возможности использования спутниковых снимков для их диагностики. Для выделения категорий местообитаний четвертого и более низких уровней применяли физиономические (окраска, текстура) и спектральные (индексы, сигнатуры) характеристики. Каждая категория диагностируется ТЕР соответствующего ранга и синтаксономическим составом растительности.

Болотные биотопы относятся к категории Ab3 – местообитания бессточных или полубессточных аккумулятивно-элювиальных ландшафтов, которая в свою очередь подразделяется на 5 категорий третьего уровня: Ab3.1 – заболоченные морские террасы с травяно (осоково и пушицево)- и кустарничково-моховыми (сфагновыми и зеленомошными) сообществами на кислых торфяных и торфянистых переувлажненных почвах; Ab3.2 – ивово (*Salix myrsinites*)-моховые заболоченные сообщества с высоким участием видов-гемикальцефитов на субстратах, обогащенных основаниями; Ab3.3 – торфяники в депрессиях рельефа, где в голоцене шло активное торфонакопление; Ab3.4 – арктические минеральные болота; Ab3.5 – низинные осоково-пушицево-гипновые и болотнотравно-осоково-гипновые болота. В пределах категорий третьего уровня выделено и охарактеризовано 10 категорий четвертого уровня. Паспорт каждой

категории содержит: название местообитания, соответствие категории EUNIS (если есть), название ТЕР, синтаксономический состав растительности (союзы, ассоциации и субсинтаксоны), словесную характеристику растительности, диагностические виды (характерные, доминанты и константные), экологические параметры (местоположение на геоморфологическом профиле, условия увлажнения, почвы, мерзлота и пр.), распространение в НАО, виды Красной книги Ненецкого автономного округа (2020) (категория или Приложение 3 к ней), угрозы и лимитирующие факторы, фотографии, источники информации.

1. Лавриненко И.А. 2020. Типология и синтаксономический состав территориальных единиц растительности: новый подход на примере изучения арктических маршей // Растительность России. № 39. С.100–148. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2020.39.100>
2. Лавриненко И.А. 2021. Классификация местообитаний восточноевропейских тундр // Труды Кольского научного центра РАН. Т. 12. № 6(9). С.13–18. <https://doi.org/10.37614/2307-5252.2021.6.12.9.001>
3. Матвеева Н.В., Лавриненко О.В. 2021. Чек-лист синтаксонов Российской Арктики: текущее состояние классификации растительности. Растительность России. № 42. С. 3–41. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2021.42.3>

ПАЛЕОСООБЩЕСТВА БОЛОТА КАНАВНОЕ НА КАРЕЛЬСКОМ ПЕРЕШЕЙКЕ

PLANT PALAECOMMUNITIES OF THE KANAVNOE MIRE
IN THE KARELIAN ISTHMUS

М.Е. Леготин, О.В. Галанина
M.E. Legotin, O.V. Galanina

Санкт-Петербургский государственный университет (г. Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: legotin-2003@mail.ru

Болото Канавное находится в Курортном районе г. Санкт-Петербурга недалеко от берега Финского залива, окруженное характерным дюнным ландшафтом. Площадь болота 1,5 кв. км. Болото располагается в Сестрорецкой низине, образовавшейся на месте лагуны Литоринового моря, существовавшего около 8.5–4.0 тыс. л. н. (Филимонова, 2009).

Перед Второй Мировой войной болото (фин. Kiisselinsuo) находилось в приграничной зоне на территории Финляндии. Заболоченная территория довольно равномерно примыкала к реке Сестре (фин. Rajajoki). Kiisselinsuo представляло собой верховое олиготрофное болото, в центральной части которого были распространены характерные формы микрорельефа – гряды, озерки и мочажины (Нууррпӓ, 1932). В пределах болота сохранились два небольших остаточных озера.

Растительный покров болота Канавное за прошедшее столетие претерпел сильную трансформацию. Ранее он был представлен вересково-сфагновыми сообществами на грядах и шейхцериево-сфагновыми мочажинам. Центральная олиготрофная часть болота была почти безлесна (Нууррпӓ, 1932). Позднее, судя по топографической карте 1939 г., болото было осушено. В настоящее время на болоте произрастают послепожарные болотные сосняки и березняки на торфе разной высоты и сомкнутости. Сосняки кустарничково-сфагновые высотой 10–12 м характеризуются доминированием багульника (*Ledum palustre*), голубики (*Vaccinium uliginosum*) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea*); отмечены черника (*Vaccinium myrtillus*) и вереск (*Calluna vulgaris*). Кассандра (*Chamaedaphne calyculata*) и морощка (*Rubus chamaemorus*) в таких фитоценозах встречаются единично. Мохово-лишайниковый ярус слагается сфагновыми, зелеными и политриховыми мхами.

Естественная болотная растительность представлена незначительными фрагментами пушицево-сфагновых с *Andromeda polifolia* и

шейхцериево-сфагновых ценозов. Некогда характерные для болота грядово-мочажинные комплексы почти не различимы из-за густой сети мелиоративных канав и выгорания гряд. Встречена деградированная мочажина с оголенным торфом и печеночными мхами, в которой произрастал *Rhynchospora alba*. Сфагновый покров несплошной. Несмотря на крайнюю степень нарушенности болотных микроландшафтов, на болоте были собраны виды, свойственные болотам, находящимся вблизи Атлантики: *Sphagnum cuspidatum*, *Sphagnum rubellum* и *S. tenellum*. Сфагнум нежный занесен в Красную книгу Санкт-Петербурга (Красная..., 2018).

Е. Нууррпӓ (1932) писал, что северная часть болота местами представляет собой лесное болото, и там растет почти полностью выросший сосново-березовый лес. В наши дни болото с севера отделено от Приморского шоссе неширокой лесной окрайкой с березой (*Betula pubescens*) и ольхой черной (*Alnus glutinosa*); присутствуют небольшие ямы антропогенного происхождения и понижения, заполненные водой. Далее, за дренажной канавой на болотной окрайке произрастает сомкнутый труднопроходимый послепожарный сосняк высотой 4–5 м, с участием березы высотой 2,5–5 м.

Бурение торфяной залежи с последующим отбором колонки проводилось 05.11.2023 г. в краевой облесенной части болотного массива в пушицево-сфагновом понижении – бывшей мочажине размером 10 x 5 м (60.13555° с. ш; 29.97776° в. д.). Кроме *Eriophorum vaginatum* были отмечены *Chamaedaphne calyculata*, *Oxycoccus palustris* и *Carex pauciflora*. В момент бурения уровень болотной воды находился у поверхности. На расположенной рядом гряде было описано сосново-пушицево-кустарничково-долгомошно-сфагновое послепожарное сообщество. Формула древесного яруса 10С+Б. Высота сосны и березы составляли 3–4 м, сомкнутость 0,3–0,4. В травяно-кустарничковом ярусе доминировала брусника, присутствовали все упомянутые выше кустарнички, за исключением морощки.

Отбор проб выполнялся с помощью зондировочного торфяного бура (модель ТБГ-66). Бурение торфяной залежи проводилось с учетом методических указаний (Методы..., 1939). Обработка торфяных проб включала в себя промывку, отмучивание и определение степени разложения для каждой пробы, выполненное с помощью микроскопического метода (Пьявченко, 1963). На основании ботанического состава выполнялась классификация торфов, включавшая выделение их типа, подтипа, группы и вида (Тюремнов, 1957). Для идентификации остатков растений в торфах использовался ряд атласов и определителей (Домбровская и др., 1959; Методы..., 1939).

Мощность торфяной залежи болота Канавное в месте бурения составила 2,4 м. Переходные торфа в исследуемой колонке представляют собой мощный торфяной пласт (2 м) и сменяются низинными торфами, которые образуют маломощный горизонт около 0,4 м толщиной. Вся переходная залежь сложена торфом моховой группы, хотя можно выделить прослойки сфагнового, пушицево-сфагнового и травяно-сфагнового торфа. Низинная залежь представлена древесной и древесно-топяной группами торфа. В древесно-топяной группе виды торфа не выделены ввиду отсутствия явных доминантов среди растений-торфообразователей. Результаты изучения образцов торфа представлены в Таблице.

Таблица. Классификация торфов скважины бурения на болоте Канавное

Тип (подтип)	Группа (глубина, см)	Вид	Торфообразующий фитоценоз
Переходный (топяной)	Моховая (0-200)	Сфагновый	Мезотрофный сфагновый с доминированием <i>Sphagnum riparium</i> , в травяном ярусе <i>Oxycoccus palustris</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> .
		Пушицево-сфагновый	Мезотрофный пушицево-сфагновый – происходит замена <i>E. vaginatum</i> на <i>E. angustifolium</i> , в моховом покрове <i>S. riparium</i> , <i>S. fallax</i> и <i>S. centrale</i> .
		Травяно-сфагновый	Мезотрофный травяно-сфагновый – появляются <i>Scheuchzeria palustris</i> , <i>Menyanthes trifoliata</i> , иногда <i>Equisetum fluviatile</i> .
Низинный (лесной)	Древесная (200-210)	Берёзово-сосновый	Евтрофный древесный с преобладанием <i>Pinus sylvestris</i> . Содоминанты – <i>Betula pubescens</i> и <i>Salix sp.</i>
Низинный (песо-топяной)	Древесно-травяная (210-240)	Явных доминантов нет	Евтрофный древесно-травяной. В древесном ярусе доминирует <i>Betula pubescens</i> и <i>Pinus sylvestris</i> . В травяном ярусе, кроме шейхцерии, вахты и хвоща, <i>Phragmites australis</i> .

На основе результатов ботанического анализа и оценки степени разложения торфа была построена диаграмма (Рис.), отражающая смену стадий растительности болота Канавное. Анализ диаграммы позволил выделить 4 стадии развития болота (палеосообщества).

Стадия I (*Betula pubescens* – *Phragmites australis*) является начальной. Она отражает растительность первых торфообразующих палеосообществ и характеризуется высоким процентным содержанием в торфе коры и древесины берёзы и, в меньшей степени, ивы, корневищ *Phragmites australis* (10%) и листовых пластин *Equisetum fluviatile* (10%). На глубине 240-210 см встречаются остатки эпидермы *Scheuchzeria palustris* (15%) и корней *Menyanthes trifoliata* (10%). Начало торфообразования на Канавном болоте связано с распространением и развитием на данной территории древесных и древесно-травяных сообществ влажных березняка с тростником, хвощем, вахтой и шейхцерией. Эти сообщества в настоящее время практически не встречаются на болоте. Древесно-травяной торф представляет собой прослойку мощностью 40 см, имеет

высокую степень разложения (45-50%) и большую примесь песчаных частиц (35%). На глубине 210 – 200 см отмечена прослойка из древесного торфа, сложенная, в основном, корой *Pinus sylvestris*. Она является отражением перехода растительности болота от стадии I к стадии II.

Стадия II (*Scheuchzeria palustris* + *Eriophorum angustifolium* – *Sphagnum centrale*) характеризуется высоким процентным содержанием корешков шейхцерии (20-25%) и пушицы узколистной (25-30%), уменьшением, а затем исчезновением коры и древесины берёзы, корневищ тростника. Из сфагновых мхов чаще всего встречается *Sphagnum centrale* (25-30%), из гипновых можно отметить примесь *Pohlia nutans* и *Scorpidium scorpioides*. Изменение ботанического состава торфа указывает на процесс выпадения берёзы из древесного яруса в конце стадии I. На стадии II началось формирование травяно-сфагновых переходных сообществ с *Pinus sylvestris* (5-10%). Травяно-сфагновый и сфагново-травяной виды торфа характеризуются достаточно высокой степенью разложения (от 30 до 40%), незначительной примесью песчаных

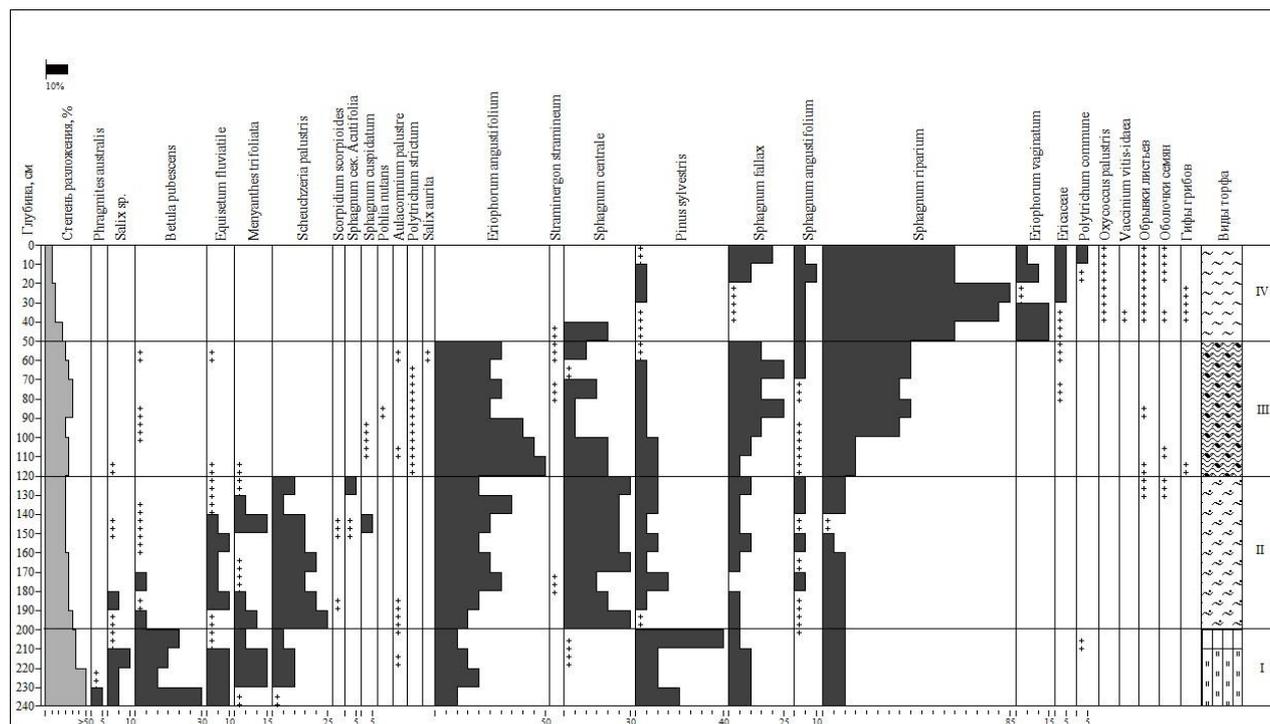


Рис. Содержание растительных остатков в торфе и стадии развития Канавного болота

частиц (около 5%) и представляют собой прослойку мощностью 80 см в центральной части колонки.

Стадия III (*Eriophorum angustifolium* – *Sphagnum riparium* + *Sphagnum fallax*) характеризуется снижением и исчезновением остатков *Scheuchzeria palustris* и *Menyanthes trifoliata*, высоким процентным содержанием волокон пушицы узколистной (40-45%) и остатков листьев и стеблей сфагновых мхов – *Sphagnum riparium* (30-35%) и *S. fallax* (20-25%). Такое сочетание макроостатков отражает растительность, характерную для пушицево-сфагновых сообществ переходного болота. Основным видом древесного яруса остаётся *Pinus sylvestris* (5-10%). Интересной особенностью этого участка колонки является стабильная примесь небольшого количества остатков листьев *Polytrichum strictum*. Основными характеристиками переходного пушицево-сфагнового торфа колонки являются степень разложения 30-35%, слабая минерализация, мощность 70 см. Накопление переходных торфов происходило на II, III и IV выделенных стадиях развития болота.

Стадия IV (*Eriophorum vaginatum* – *Sphagnum riparium*) характеризуется высоким процентным содержанием остатков сфагновых

мхов – *Sphagnum riparium* (75%), *S. angustifolium* (10%), *S. fallax* (15%), а также замещением остатков корней *Eriophorum angustifolium* на *E. vaginatum*, что указывает на активность процесса олиготрофизации. Об этом же свидетельствует обилие корней болотных кустарничков - *Охуссус palustris*, *Vaccinium vitis-idaea* и других представителей сем. *Ericaceae*. Сфагновый торф имеет самую низкую степень разложения (10-15%), имеет незначительную примесь песчаных частиц (менее 5%) и представляет собой прослойку мощностью 50 см в верхней части колонки. Отметим, что в составе торфяной колонки болота Канавное отсутствуют макроостатки осок, хотя осока мелкоцветковая нами на болоте была отмечена.

Сравнивая полученные результаты с палеосообществами западной части Сестрорецкого болота (Природа., 2018), отметим следующие сходные черты: мощность торфяной залежи, четыре стадии в торфонакоплении, преобладание березы пушистой и хвоща топяного на начальной стадии болотообразования, заметное доминирование шейхцерии на второй стадии. *Sphagnum riparium* и *S. fallax* заметно выделяются в составе палеосообществ на третьей и современной стадиях развития болота в верхнем метровом слое торфяных отложений.

Авторы выражают благодарность М.Е. Никчемному и А.Е. Тюпаевой за помощь в сборе полевых материалов, а также сотрудникам лаборатории болотных экосистем ИБ КарНЦ РАН к.б.н. М.А. Бойчук, Е.Л. Талбонен, к.б.н. С.А. Кутенкову и д.б.н. О.Л. Кузнецову за всестороннюю помощь.

1. Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М.; Л., 1959.
2. Красная книга Санкт-Петербурга. Санкт-Петербург, 2018. С. 24.
3. Методы исследования торфяных болот / Под ред. М. И. Нейштадт. В 2 частях // Труды центральной торфяной опытной станции. М., 1939. Ч. 1. 171 с.; ч. 2. 319 с.
4. Природа Сестрорецкой низины. Санкт-Петербург, 2011. С. 49.
5. Пьявченко Н.И. Степень разложения торфа и методы ее определения. Красноярск, 1963.
6. Тюремнов С.Н. Районирование торфяных месторождений // Торфяные месторождения Западной Сибири. М., 1957. С. 129–142.
7. Филимонова Л.В. Динамика растительности восточного побережья Финского залива в голоцене. Труды КарНЦ РАН №4. Петрозаводск, 2009. С. 11-29.
8. Нуурпӓ Е. Die postglazialen niveauverschiebungen auf der Karelischen landenge. Annales Academie Scientiarum Fennicae. Serie A. Tom. XXXVII, N:o 1. Helsinki, 1932.

КЛАСС ALNETEA GLUTINOSAE – ЛЕСА НА НИЗИННЫХ БОЛОТАХ ЕВРОПЫ И АЗИИ

CLASS ALNETEA GLUTINOSAE – WOODED SWAMPS AND MIRES OF EUROPE AND ASIA

О.В. Морозова

O.V. Morozova

Институт географии РАН (г. Москва, Россия)

E-mail: olvasmor@mail.ru

Лесные болота с доминированием видов ольхи, а также других видов деревьев и с длительным периодом затопления известны на большей части Европы и на северо-западе Азии (в Западной Сибири). По классификации Браун-Бланке они составляют класс *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et Tx. ex Westhoff et al. 1946. Класс выделен в Центральной Европе и в основном на материалах из неморальной зоны (Douda, 2008; Douda et al., 2016; Mucina et al., 2016), но при описании лесов на низинных болотах Восточной Европы и Сибири его ареал значительно расширился, и возникла необходимость пересмотра состава класса и его внутренней иерархии.

Вплоть до настоящего времени состав класса *Alnetea glutinosae* (cl. Ag) дискусионен. Первоначально объединяющий сообщества с черной ольхой, в настоящее время этот класс включает леса на болотах богатого грунтового питания, образованные не только ольхой, но и другими видами деревьев. Основные проблемы, возникающие в подобных случаях: это объем класса, а также отличие его синтаксонов от близких по составу и структуре сообществ других классов. В случае с классом *Ag* – в основном от галерейных пойменных лесов с участием черной ольхи класса *Alno–Populetea glutinosae* и от заболоченных лесов бореального класса *Vaccinio-Piceetea*.

Для анализа состава класса рассмотрены синтаксоны ранга ассоциации и ниже опубликованные в открытой печати. Всего проанализировано 126 ценофлор синтаксонов из Восточной Европы и Западной Сибири: 23 из класса *Alno–Populetea glutinosae*, 98 – класса *Ag*, 5 ценофлор класса *Vaccinio-Piceetea* (сфагновые березняки на лесных болотах асс. *Vaccinio uliginosi–Betuletum*).

В классе *Ag* три порядка: *Alnetalia glutinosae* Tx. 1937, *Calamagrostio purpureae–Piceetalia obovatae* Lapshina 2010 и *Salici pentandrae–Betuletalia pubescentis* Clausnitzer in

Dengler et al. 2004. Не вызывает вопросов порядок *Alnetalia glutinosae* Tx. 1937 с единственным союзом *Alnion glutinosae* Malcuit 1929, который объединяет черноольховые эвтрофные и мезо-эвтрофные леса на низинных болотах Европы. Ареал порядка и союза определяется ареалом основного вида – ольхи черной, которая распространена в Европе, от юга Скандинавии до Средиземноморья. Сообщества союза близки к пойменным лесам с *Alnus glutinosa* (класса *Alno–Populetea glutinosae*), которые отличаются особенностями гидрологического режима, а также значительным участием видов класса широколиственных лесов (Морозова и др., 2021). На ординационной диаграмме ценофлоры обоих классов хорошо дифференцированы (рис. 1).

Логично вписывается в структуру класса и порядок *Salici pentandrae–Betuletalia pubescentis* (союз *Salici pentandrae–Betulion pubescentis* Clausnitzer in Dengler et al. 2004), представляющий собой березовые низинные болота и болотные мелколесья богатого грунтового и грунтово-речного питания регионов Европы и Сибири.

Еловые (с *Picea abies*, *P. obovata*), березово (*Betula pubescens*)-еловые и с другими видами деревьев (*Larix sibirica*, *Pinus sylvestris*) леса на болотах богатого грунтового питания в регионах гемибореальной зоны Восточной Европы и юга лесной зоны Сибири объединены в порядок *Calamagrostio purpureae–Piceetalia obovatae*. В чек-листе растительных сообществ Европы Mucina и соавторы (Mucina et al., 2016) разместили этот порядок в классе бореальных лесов *Vaccinio-Piceetea* на том основании, что в древостое доминирует *Picea abies*, и в сообществах могут присутствовать виды бореальных лесов. Как отмечено при описании сообществ лесных болот Валдайской возвышенности (на Северо-Западе России), в них почти равное участие диагностических видов как класса бореальных лесов,

так и черноольховых болот (Коротков, 1991). Однако число видов низинных эвтрофных болот и их роль в структуре сообществ значительны: по соотношению долей видов с учетом обилия они преобладают, что позволяет поместить данный порядок в класс черноольховых болот. Участие видов бореальных лесов в сообществах учтено при выделении диагностических видов порядка, среди которых *Picea abies* и *P. obovata*, *Hylocomium splendens*, *Maianthemum bifolium*, *Plagiomnium ellipticum*, *Plagiothecium denticulatum*, *Pleurozium schreberi*, *Pyrola rotundifolia*, *Rhizomnium pseudopunctatum*, *Rubus arcticus*, *Rubus saxatilis*, *Trientalis europaea*. В порядке три союза. Один – ***Calamagrostio canescentis–Piceion abietis*** Solomeshch in Willner et al. 2016 объединяет гемибореальные восточноевропейские еловые и березово-еловые болотные леса богатого грунтового питания. Два других представляют собой березово-сосновые и темнохвойные лесные болота юга лесной зоны Западной Сибири (Лапшина, 2010). Однако различия между сообществами

обоих сибирских союзов минимальные, и на ординационной диаграмме (рис. 1) эти синтаксоны занимают единое пространство и плохо дифференцированы, что позволяет рассматривать их в рамках одного союза.

Спорно отнесение к классу **Ag** сообществ, представляющих собой березовые (*Betula pubescens*) мезотрофные и олиго-мезотрофные заболоченные леса и лесные болота Европы. Подобные сообщества описаны в Европе и объединены в рамках порядка ***Sphagno–Betuletalia pubescentis*** Scamoni et Passarge 1959, который, по мнению европейских фитосоциологов (Mucina et al., 2016), должен быть отнесен к классу черноольховых лесных болот. Однако и по соотношению различных групп диагностических видов, и по структуре, и по экологии подобные сообщества сильно выбиваются из общего массива лесов на низинных болотах. В сообществах, объединенных в упомянутом выше порядке, с высокой константностью встречаются виды бореальных хвойных лесов (*Melampyrum pratense*, *Pinus*

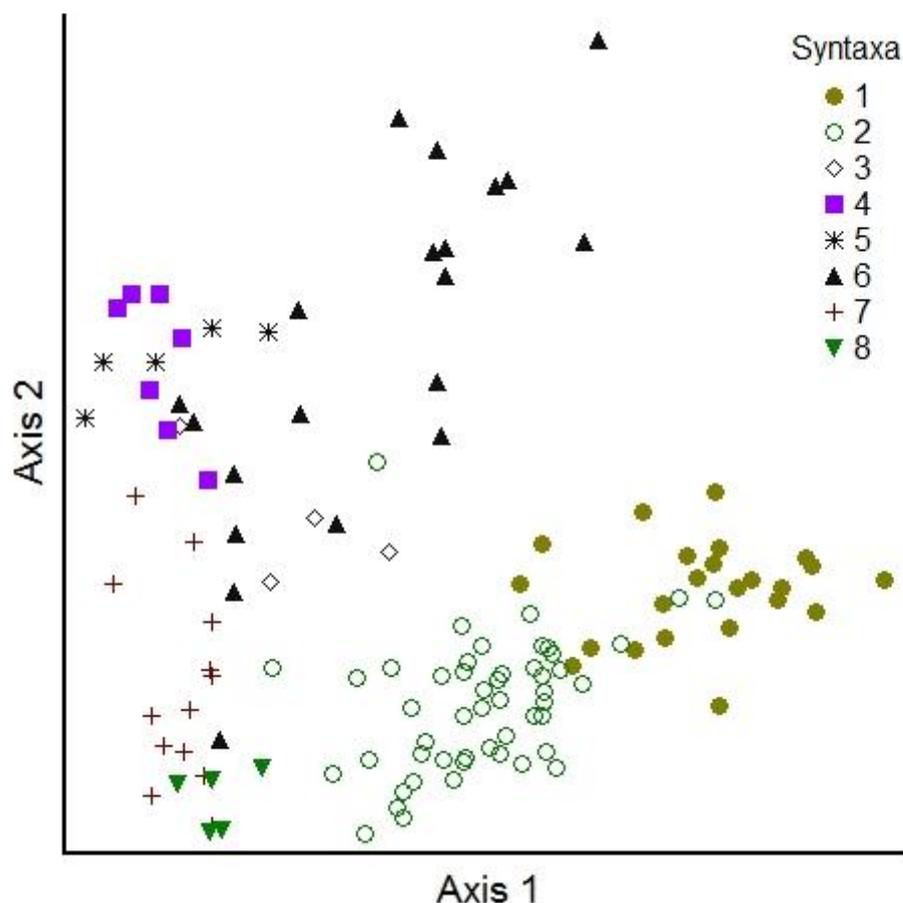


Рис. 1. Ординация ценофлор синтаксонов *Alnetea glutinosae* (методом DCA). Синтаксоны (Syntaxa): 1 – кл. *Alno–Populetea glutinosae*, 2 – поп. *Alnetalia glutinosae* (cl. Ag), 3 – союз *Calamagrostio canescentis–Piceion abietis* (поп. *Calamagrostio purpureae–Piceetalia obovatae*, cl. Ag), 4 – союз *Carici cespitosae–Piceion obovatae* (поп. *Calamagrostio purpureae–Piceetalia obovatae*, cl. Ag), 5 – *Carici appropinquatae–Laricion sibiricae* (поп. *Calamagrostio purpureae–Piceetalia obovatae*, cl. Ag), 6 – поп. *Salici pentandrae–Betuletalia pubescentis* (cl. Ag), 7 – поп. *Sphagno–Betuletalia pubescentis* (cl. *Vaccinio–Piceetea*), 8 – acc. *Vaccinio uliginosi–Betuletum* (cl. *Vaccinio–Piceetea*).

silvestris, *Pleurozium schreberi*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*), присутствуют виды верховых болот (*Andromeda polifolia*, *Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum angustifolium*, *S. divinum* и др.), а участие альнетальной группы минимально. По видовому составу такие сообщества – переходные между классами бореальных лесов и открытых олиготрофных болот (**Oxycocco-Sphagnetea**). На ординационной диаграмме синтаксоны порядка занимают пространство общее с ассоциацией сфагновых лесных болот из класса **Vaccinio-**

Piceetea (рис. 1), что подтверждает их положение в данном классе.

Единство класса в предложенном выше объеме согласуется с мнением о едином филоценогенезисе группы видов, связанных с гигрофитными тенистыми лесами из ольхи черной, объединенными в ольшанниковую (альнетальную) эколого-историческую свиту (Зозулин, 1973; Камелин, 2017). Именно эти виды являются диагностическими для класса **Ag** и значимы в синтаксонах его трех порядков.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИГ РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8).

1. Зозулин Г.М. 1973. Исторические свиты растительности европейской части СССР // Бот. журн. Т. 58. № 8. С. 1081–1092.
2. Камелин Р.В. 2017. Флора Севера Европейской России (в сравнении с близлежащими территориями): Учебное пособие. СПб. 241 с
3. Коротков К.О. 1991. Леса Валдая. М.: Наука. 160 с.
4. Лапшина Е.Д. 2010. Растительность болот юго-востока Западной Сибири. Новосибирск. 186 с.
5. Морозова О.В., Беляева Н.Г., Гнеденко А.Е., Суслова Е.Г., Черненко Т.В. 2021. Синтаксономия и экология черноольшаников Московской области // Растительность России. № 42. С. 42–62. <https://doi.org/10.31111/vegus/2021.42.42>
6. Douda J. 2008. Formalized classification of the vegetation of alder carr and floodplain forests in the Czech Republic // Preslia. Vol. 80 P. 199–224.
7. Douda J., Boublík K., Slezák M., Biurrun I., Nociar J., Havrdová A., Doudová J., Ačić S., Brisse H., Brunet J., Chytrý M., Claessens H., Csiky J., Didukh Y., Dimopoulos P., Dullinger S., FitzPatrick Ú., Guisan A., Horchler P.J., Hrivnák R., Jandt U., Kački Z., Kevey B., Landucci F., Lecomte H., Lenoir J., Paal J., Paternoster D., Pauli H., Pielech R., Rodwell J.S., Roelandt B., Svenning J.-C., Šibík J., Šilc U., Škvorc Ž., Tsiripidis I., Tzonev R.T., Wohlgemuth T., Zimmermann N.E. 2016. Vegetation classification and biogeography of European floodplain forests and alder carrs // Applied Vegetation Science. Vol. 19. № 1. P. 147–163. <https://doi.org/10.1111/avsc.12201>
8. Mucina L., Bültmann H., Dierßen K., Theurillat J.-P., Raus T., Čarni A., Šumberová K., Willner W., Dengler J., Gavilán García R., Chytrý M., Hájek M., Di Pietro R., Iakushenko D., Pallas J., Daniëls F. J. A., Bergmeier E., Santos Guerra A., Ermakov N., Valachovič M., Schaminée J.H.J., Lysenko T., Didukh Ya.P., Pignatti S., Rodwell J.S., Capelo J., Weber H. E., Solomeshch A., Dimopoulos P., Aguiar C., Freitag H., Hennekens S.M., Tichý L. 2016. Vegetation of Europe: Hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities // Applied Vegetation Science. Vol. 19(1). P. 1–264. <https://doi.org/10.1111/avsc.12257>

О РЕДКИХ ВИДАХ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ НА БОЛОТАХ БАШКИРСКОГО ЗАУРАЛЬЯ

ON RARE VASCULAR PLANT SPECIES IN THE MIRES OF THE BASHKIR TRANS-URAL REGION

А.А. Мулдашев, М.К. Ишбулатов, П.С. Широких, В.Б. Мартыненко, Э.З. Баишева, И.Г. Бикбаев

A.A. Muldashev, M.K. Ishbulatov, P.S. Shirokikh, V.B. Martynenko, E.Z. Baisheva, I.G. Bikbaev

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (г. Уфа, Россия)
E-mail: elvbai@mail.ru

Болотные экосистемы играют важную роль в поддержании гидрологического и гидрохимического режима ландшафтов и являются носителями высокого биологического разнообразия, включающего множество редких и нуждающихся в охране видов. Тем не менее, во многих регионах мира степень изученности биоразнообразия болот остается довольно низкой.

Башкирское Зауралье представляет восточную часть Республики Башкортостан (РБ), включает низкогорья и предгорья восточного склона Южного Урала, а также Сакмаро-Таналыкскую и Кизило-Уртазымскую равнины. Растительность представлена преимущественно лесостепными и степными сообществами. (Япаров, 2005). В системе зонирования болот мира (Кац, 1971), Башкирское Зауралье входит в провинцию южных степей и пустынь Казахстана с тростниковыми и солеными болотами. Болота Башкирского Зауралья расположены преимущественно у подножий и на склонах гор и холмов, в бессточных котловинах и в поймах рек. По типу питания являются преимущественно эвтрофными, растительный покров в основном представлен тростниковыми и осоково-гипновыми березняками и черноольшаниками, а также безлесными тростниковыми, тростниково-осоковыми и гипново-осоковыми сообществами (Брадис, 1951).

В прошлом столетии экосистемы болот РБ значительно пострадали в результате хозяйственной деятельности человека. Антропогенная нагрузка на данные экосистемы продолжает оставаться высокой до сих пор, особенно в лесостепных районах, где в засушливые летние периоды на болотах происходит интенсивный выпас скота.

Целью работы является обобщение данных о представленности редких и нуждающихся

в охране видов сосудистых растений на болотах Башкирского Зауралья.

На настоящий момент на болотах Башкирского Зауралья выявлено 32 редких и нуждающихся в охране на территории РБ видов растений. На болотах Султанкулевское (Абзелиловский район РБ) и Камыш-Саз (Баймакский район РБ) и болотах Карпис (Гумасы) и Чистое (Учалинский район РБ) обнаружены популяции *Liparis loeselii* (L.) Rich. и *Orchis militaris* L., включенных в Красную книгу России (Приказ..., 2023).

Также на болотах Башкирского Зауралья отмечено 24 вида, внесенных в Красную книгу Республики Башкортостан (Мартыненко, 2021), в том числе 7 видов с категорией охраны 1 (виды, находящиеся под угрозой исчезновения): *Allium hymenorhizum* Ledeb., *Carex bohémica* Schreb., *Carex media* R. Br., *Herminium monorchis* (L.) R. Br., *Liparis loeselii* (L.) Rich., *Malaxis monophyllos* (L.) Sw., *Saxifraga hirculus* L.; 12 видов с категорией охраны 2 (виды, сокращающиеся в численности и/или распространении): *Dactylorhiza ochroleuca* (Wustn. ex Boll.) Holub, *Drosera anglica* Huds., *Eriophorum gracile* Koch и др.; 5 видов с категорией охраны 3 (редкие виды): *Epipactis palustris* (L.) Crantz, *Trichophorum alpinum* (L.) Pers. и др.

В Приложение II «Список объектов растительного мира и грибов, которые нуждаются в особом внимании к их состоянию в природной среде и мониторинге» к Красной книге РБ (Мартыненко, 2021) входит 8 видов (*Carex dioica* L., *Iris sibirica* L., *Saussurea parviflora* (Poir.) DC. и др.).

Часть редких и нуждающихся в охране видов, входят в приложение к Бернской конвенции (Convention..., 1979) (*Artemisia laciniata* Willd., *Liparis loeselii* (L.) Rich. и *Saxifraga hirculus* L.).

Поиск новых местонахождений и мониторинг локальных популяций редких видов растений на болотах Башкирского Зауралья являются необходимым условием для организации эффек-

тивной охраны биоразнообразия этого региона, характеризующегося высокой степенью сельскохозяйственной освоенности.

1. Брадис Е.М. 1951. Торфяные болота Башкирии. Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. Киев. 687 с.
2. Кац Н.Я. 1971. Болота земного шара. М.: Наука. 295 с.
3. Мартыненко В.Б. (ред.). 2021. Красная книга Республики Башкортостан: в 2 т. Т 1: Растения и грибы. 3-е изд., доп. и переработ. Москва: Студия онлайн. 392 с.
4. Приказ 23.05.2023 № 320 "Об утверждении Перечня объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации". Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1301909451> (дата обращения: 20.04.2024)
5. Япаров И. М. (ред.). 2005. Атлас Республики Башкортостан. Уфа: Китап. 420 с.
6. Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats. Appendix I, 1979. [Электронный ресурс]. URL: CETS 104 - Annex I - Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats (coe.int) (дата обращения: 20.04.2024)

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВ РАКОВИННЫХ АМЁБ И РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ПРИМЕРЕ БОЛОТНОГО МАССИВА СТАРОСЕЛЬСКИЙ МОХ (ВАЛДАЙСКАЯ ВОЗВЫШЕННОСТЬ)

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE OF TESTATE AMOEBA ASSEMBLAGES AND VEGETATION COVER ON THE EXAMPLE OF THE STAROSELSKY MOKH WETLAND (VALDAI UPLAND)

М.С. Парамонов¹, А.Н. Цыганов¹, О.В. Чередниченко¹, В.Э. Федосов¹, А.В. Шкурко¹, Т.Ю. Минаева², Е.А. Шуйская², Н.Г. Мазей¹, Ю.А. Мазей¹, M.S. Paramonov¹, A.N. Tsyganov¹, O.V. Cherednichenko¹, V.E. Fedosov¹, A.V. Shkurko³, T.Yu. Minayeva⁴, E.A. Shuiskaya², N.G. Mazei¹, Yu.A. Mazei¹.

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (г. Москва, Россия)

² Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник (пос. Заповедный Россия)

³ Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН (г. Москва, Россия)

⁴ Care for Ecosystems UG (Goerlitz, Germany)

E-mail: paramis00@mail.ru

Болота являются критически важными экосистемами для процессов накопления углерода, регуляции гидрологического режима, естественной фильтрации поверхностных вод и сохранения биоразнообразия (Mitsch et al., 2015). Функционирование сообществ болотных микроорганизмов контролируется активностью гетеротрофных простистов, среди которых одними из важнейших являются раковинные амёбы (Reczuga et al., 2018). Раковинные амёбы – это полифилетическая группа протистов, включающая в себя представителей Amoebozoa, Rhizaria и Stramenopiles, объединённые по морфологическим критериям – представители этой группы являют собой ползающую амёбу, заключённую в наружное скелетное образование – раковинку (Левушкин и Шилев, 1994). Структура сообществ раковинных амёб динамично реагирует на изменение состояния окружающей среды, что позволяет рассматривать данную группу в качестве биоиндикаторов (Mitchell and Gilbert, 2004).

Обычно в качестве факторов, влияющих на распределение видов раковинных амёб используются абиотические характеристики среды, однако возможная модуляция этого взаимодействия локальной растительностью остаётся не до конца исследованной. До 40% ассимилированного в ходе фотосинтеза углерода (Lynch and Whipps, 1990) растения выделяют в форме корневых экссудатов, которые становятся питательной средой для ризобактерий, являющихся пищей ряда видов раковинных амёб, под влиянием которых структура ризосферного микробиома существен-

но меняется (Bonkowski, 2004). Раковинные амёбы принимают активное участие в микробной петле, стимулируя возвращение заключённых в органике элементов питания в доступные для автотрофов формы (Bonkowski, 2004), а раковинки мёртвых особей могут в свою очередь использоваться растениями в качестве источника минеральных веществ (Vohník et al., 2008). Цель настоящей работы заключалась в выявлении взаимосвязей между раковинными амёбами и растениями на уровне болотных микроландшафтов на примере болотного массива Старосельский мох и прилегающих участков (охранная зона Центрально-Лесного биосферного государственного заповедника, Тверская область, Россия).

Центрально-Лесной биосферный государственный заповедник (ЦЛБГЗ, 32.7°–33.1° в.д., 56.4°–56.6° с.ш.) находится в южной части Валдайской возвышенности в зоне хвойно-широколиственных южно-таёжных лесов. Болотный массив Старосельский мох занимает площадь 617 га на водоразделе притоков рек Межа Западнотвинского бассейна и Туд Волжского бассейна. Растительный покров является типичным для верховых болот зоны южной тайги (Минаева и др., 2007). Окрайки болота на склонах заняты типичной серией олиготрофных сосновых болот и заболоченных сосняков, выположенные окрайки – заболоченными мезотрофными березняками, в участках выклинивания грунтовых вод – черноольховыми болотами с примесью ели. Переувлажнённые участки болотных водотоков или повышенного стока с минеральных участков заняты осоковыми топями

или сфагновыми коврами. Пологие склоны выпуклой части болота представляют собой облесённые и открытые грядово-мочажинные комплексы.

Сбор образцов для ризоподного анализа включал два массива данных: в 2021 году образцы отбирали на периферийной части болотного массива в различных болотных микроландшафтах, как основных функциональных единиц (Minayeva, Sirin, 2012). В 2022 году сбор образцов проводился на трансекте, проходящей сквозь условный центр болота от одной окрайки до другой также по типам микроландшафтов на различных микроформах. Растительность на этом участке была более однородна, однако изменялся градиент абиотических показателей (прежде всего, глубины залегания болотных вод и pH). Для каждой точки проводилось ботаническое описание, с указанием типа микроформы (кочка, лужайка, мочажина), проективного покрытия всех видов сосудистых растений и мохообразных с камеральной видовой идентификацией. Кроме того, на точках сбора образцов проводилось измерение ряда абиотических факторов, таких как уровень болотных вод (УБВ), pH и минерализация (TDS) болотных вод, температура приповерхностного слоя воздуха, воды и субстрата на глубине 0, 5, 10 и 15 см. Статистическая обработка данных проис-

ходила при помощи программного обеспечения «R» с использованием пакетов “vegan”, “dplyr”, “ggrepel”, “FactoMineR”.

В ходе исследования было идентифицировано в общей сложности 22 149 раковинок амёб, принадлежащих к 103 видам и подвидам, большая часть которых являлась типичными сфагнобионтами.

При сопоставлении интегральных характеристик ризоподных и растительных сообществ, наблюдалась статистически значимая отрицательная корреляция между видовым богатством сосудистых растений и раковинных амёб, что может объясняться противоположным отношением этих групп к повышению влажности. Корреляция между числом видов мхов и раковинных амёб, напротив, была положительной, хотя и менее значимой ($p=0,066$). Из-за разнонаправленности корреляций, анализ корреляции всего растительного сообщества демонстрировал меньшую статистическую значимость, чем анализ его компонентов по отдельности. Схожая картина наблюдалась и при оценке биоразнообразия, выраженного индексом Симпсона, однако корреляции между видовым разнообразием раковинных амёб и мохообразных, также как и всех растениями в совокупности, не были близки к статистически значимым (рисунок).

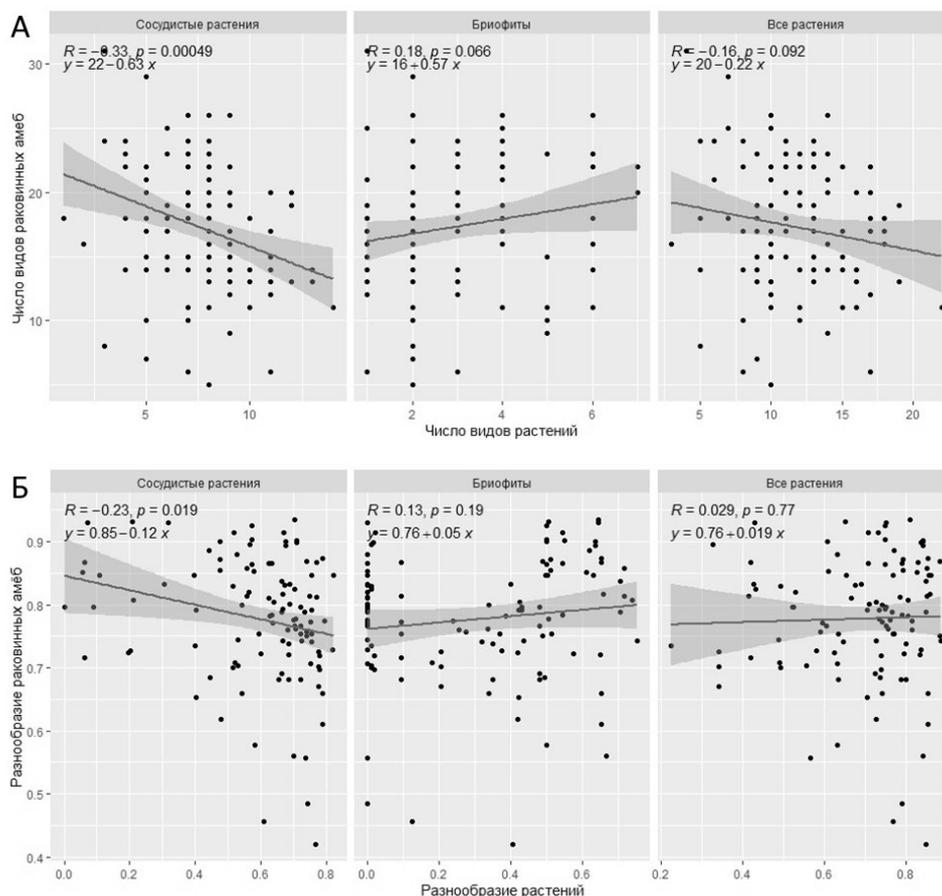


Рисунок. Корреляция видового богатства (а) и индекса биоразнообразия Симпсона (б) раковинных амёб и сосудистых растений, мхов и растительного покрова в целом

Для оценки того, насколько схожим образом изменялись абиотические показатели среды и видовая структура сосудистых растений, мхов и раковинных амёб, использовался многофакторный анализ (Multiple factor analysis, MFA). Между всеми группами данных было заметно статистически значимое взаимодействие, наиболее сильно выраженное между сосудистыми растениями и мхами (таблица). Корреляция между совокупным объединением абиотических факторов и прочими группами оказалась слабее, чем среди

биотических компонентов друг с другом, однако это может объясняться разнонаправленностью и независимостью различных составляющих группы абиотических факторов, а также известным фактом, что в маловидовых сообществах с высоким уровнем приспособления к стрессовым условиям, ответ на изменения условия среды часто происходит не на уровне вариации видового состава, а на уровне внутривидовых модификаций и изменений структуры популяций (Minayeva et al., 2017).

Таблица. Попарная корреляция между различными группами данных

	Абиотические характеристики	Сосудистые растения	Бриофиты	Раковинные амёбы
Абиотические характеристики	1	$p=1.9 \cdot 10^{-5}$	$p=1.4 \cdot 10^{-9}$	$p=6.5 \cdot 10^{-8}$
Сосудистые растения	0.161	1	$p=8.3 \cdot 10^{-5}$	$p=7.4 \cdot 10^{-3}$
Бриофиты	0.208	0.407	1	$p=2.8 \cdot 10^{-3}$
Раковинные амёбы	0.200	0.299	0.285	1
MFA	0.459	0.714	0.773	0.645

Таким образом, данные полевых наблюдений позволяют заключить, что между раковинными амёбами и растениями на уровне как сообществ, так и отдельных видов наблюдаются связи, дальнейшее изучение которых позволит

получить более комплексное представление о функционировании болотных экосистем и поможет уточнить используемые сейчас модели палеореконструкций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 24-14-00065.

1. Левушкин С. И., Шилов И. А. Общая зоология. – 1994.
2. Минаева Т. Ю. и др. Очерк болот Центрально-Лесного заповедника //Труды Центрально-Лесного заповедника. – 2007. – №. 4. – С. 267-296.
3. Mitsch W. J., Bernal B., Hernandez M. E. Ecosystem services of wetlands //International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management. – 2015. – Т. 11. – №. 1. – С. 1-4.
4. Bonkowski M. Protozoa and plant growth: the microbial loop in soil revisited //New Phytologist. – 2004. – Т. 162. – №. 3. – С. 617-631.
5. Lynch J. M., Whipps J. M. Substrate flow in the rhizosphere //Plant and soil. – 1990. – Т. 129. – С. 1-10.
6. Mitchell E. A. D., Gilbert D. Vertical micro-distribution and response to nitrogen deposition of testate amoebae in Sphagnum //Journal of Eukaryotic Microbiology. – 2004. – Т. 51. – №. 4. – С. 480-490.
7. Minayeva T. Yu., Sirin A. A. Peatland biodiversity and climate change // ISSN 20790864, Biology Bulletin Reviews, 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 164–175. Pleiades Publishing, Ltd., doi:10.1134/s207908641202003x (Original Russian Text: T.Yu. Minayeva, A.A. Sirin, 2011, published in Uspekhi Sovremennoi Biologii, 2011, Vol. 131, No. 4, pp. 393–406.)
8. Minayeva T.Yu., Bragg O.M., Sirin A.A. Towards ecosystem-based restoration of peatland biodiversity // Mires and Peat, Volume 19 (2017), Article 01, 1–36, DOI: 10.19189/MaP.2013.OMB.150
9. Reczuga M. K. et al. Predator–prey mass ratio drives microbial activity under dry conditions in Sphagnum peatlands // Ecology and Evolution. – 2018. – Т. 8. – №. 11. – С. 5752-5764.
10. Vohník M., Albrechtová J., Vosátka M. The application of inocula based on ericoid mycorrhizal, DSE and saprotrophic fungi in conventional, semi-conventional, semi-organic and organic cultivation of highbush blueberries. – 2008.

ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ

THE IMPACT OF FIRES ON THE DYNAMICS OF VEGETATION COVER IN THE MIDDLE TAIGA ZONE OF WESTERN SIBERIA DURING THE HOLOCENE

М.А. Пупышева¹, Т.А. Бляхарчук^{1,2}
М.А. Pupyshева¹, Т.А. Blyakharchuk^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

² Национальный исследовательский Томский государственный университет (г. Томск, Россия)

E-mail: 455207@mail.ru

С конца XX века и по настоящее время во всем мире наблюдается тенденция к увеличению пожарной активности, включая северные районы Западной Сибири. Продолжающееся изменение климата может спровоцировать новые очаги пожаров и сопутствующую им перестройку природных экосистем. Чтобы понять закономерности влияния пожаров на лесоболотные комплексы Западной Сибири и составить долгосрочные прогнозы пространственно-временной динамики пожаров, необходимы данные за более длительный период времени, охватывающий весь голоцен. В этом могут помочь озерно-болотные отложения, представляющие собой надежный «архив» палеоэкологической информации.

В качестве объекта изучения выбрано болотное озеро «S14», расположенное в центральной части Западно-Сибирской равнины, в 23 км к юго-западу от г. Ханты-Мансийска. Во время полевых работ был отобран керн донных отложений мощностью 231 см. В радиоуглеродной лаборатории г. Познань (Польша) было получено 5 радиоуглеродных УМС датировок. На основе радиоуглеродных дат, откалиброванных в программе Bacon (Blaauw, Christen, 2011) в R 4.0.4 (R Core Team, 2020), построена глубинно-возрастная модель донных отложений озера «S14» (Пупышева, Бляхарчук, 2024). Для реконструкции локальной динамики пожаров использовался метод макроуголькового анализа (Mooney, Tinner, 2011). Статистическая обработка полученных данных осуществлялась в программном пакете CharAnalysis (Higuera, 2009) в R (R Core Team, 2020). Для подтверждения связей между пожарной активностью и растительным покровом проведен корреляционный анализ методом Пирсона в программе PAST (Hammer et al., 2001) на основе сравнения микро- и макрочастиц угля с содержанием пылицы преобладающих растительных таксонов в спорово-пыльцевых спектрах озера «S14».

Согласно данным радиоуглеродного датирования, формирование озерных отложений в озере «S14» началось 11920 кал. л. н. За это время произошло 16 достоверных локальных пожарных эпизодов (Пупышева, Бляхарчук, 2024). Полученные результаты были также сопоставлены с динамикой ландшафтов и региональных пожаров, полученных посредством спорово-пыльцевого и макроуголькового анализов соответственно, а также с климатическими периодами голоцена. Это позволило выделить три периода максимальной пирогенной активности.

Первый период зафиксирован на границе пребореального и бореального периодов голоцена (11500-10400 кал. л. н.). В это время в растительном покрове доминирующую роль занимали лиственнично-еловые леса. Вероятно, сухие климатические условия и первое голоценовое потепление повлияли на увеличение интенсивности пожаров. В середине атлантического периода произошел второй пик пожаров (7500-6800 кал. л. н.), по всей видимости, связанный с усилением грозовой активности в теплых и влажных условиях климата. Окружающие ландшафты были представлены смешанными елово-сосново-березовыми лесами. Третий период высокой интенсивности пожаров пришелся на малый ледниковый период (400-250 кал. л. н.), вероятно, из-за наступления сухости климата. В это время значительную роль в растительном покрове занимали смешанные кедрово-березово-сосновые леса.

Для определения влияния пожарной активности на растительный покров, проведен корреляционный анализ основных пыльцевых таксонов растительности с частицами угольков. Отмеченные корреляции значимы при $P < 0,05$. Частицы микро- и макроугольков положительно коррелируют друг с другом ($c = 0,73$), а также с елью сибирской (*Picea obovata*) ($c = 0,47$ и $0,27$ соответственно) и со злаками (*Poaceae*)

($c = 0,76$ и $0,75$ соответственно). При этом, синхронная отрицательная корреляция микро- и макроугольков зафиксирована с сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) ($c = -0,67$ и $-0,54$ соответственно), кедром (*Pinus sibirica*) ($c = -0,34$ и $-0,21$ соответственно), пихтой сибирской (*Abies sibirica*) ($c = -0,43$ и $-0,26$ соответственно) и березой повислой (*Betula pendula*) ($c = -0,43$ и $-0,49$ соответственно).

В результате проведенных исследований выявлено, что частицы микро- и макроугольков

синхронно коррелируют с одними и теми же таксонами: отрицательно с березой повислой, сосной обыкновенной и пихтой сибирской, и положительно со злаками и елью сибирской. При этом отмечено, что часто минимальные значения содержания пыльцы в отложениях соответствовали максимальным пикам пожаров, увеличиваясь по мере постпирогенного восстановления растительного покрова. Это подтверждает прямое влияние пожаров на формирование растительных ландшафтов в исследуемом регионе.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00217.

1. Пупышева М.А., Бляхарчук Т.А. Реконструкция голоценовой истории палеопожаров в среднетаежной подзоне Западной Сибири по данным макроуголькового анализа озерных отложений // Геосферные исследования. – 2024. – № 1. – С. 135-151. – DOI 10.17223/25421379/30/8. – EDN KAPWNX.
2. Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an 601 autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6: 457–474
3. Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. Past - palaeontological statistics. <http://www.uv.es/~pardomv/pe/2001>
4. Higuera P. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Bozeman: MT, Montana State University, 2009. 27 p.
5. Mooney S.D., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments // *Mires and Peat*. – 2011. – Т. 7. – №. 9. – С. 1-18.
6. R Core Team R: a language and environment for statistical computing [Electronic resource]: R foundation for statistical computing. 2020. URL: www.r-project.org/index.html (accessed: 20.04.2023)

ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАЗОВОМ КОШЕНИИ ТРОСТНИКА И УДАЛЕНИИ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ НИЗИННОГО БОЛОТА (ЗАКАЗАНИК «ЗВАНЕЦ», БЕЛАРУСЬ)

VEGETATION CONDITION RESEARCH DURING ONE-TIME MOWING OF REEDS AND SHRUB REMOVAL ON THE FEN'S TERRITORY ("ZVANETS" RESERVE, BELARUS)

О.С. Смирнова, Е.В. Мойсейчик, Н.А. Зеленкевич
O.S. Smirnova, E.V. Mojsejchik, N.A. Zelenkevich

Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)
E-mail: olia.rymsha@mail.ru

Исследование проводили на территории республиканского заказника «Званец», который создан в 1996 г. в целях сохранения эталонных участков естественных болотно-луговых и лесных угодий с богатым растительным и животным миром, стабилизации гидрологического режима территории.

В полевой сезон 2019 г. изучали влияние хозяйственных мероприятий (выкашивание биомассы тростника и удаление древесно-кустарниковой растительности (ДРК) осенью 2018 г.) на паре постоянных пробных площадей (ППП) с близкими эколого-фитоценотическими параметрами в пределах эколого-фитоценотического профиля (ЭПР) «Званец-5» (Груммо, 2022).

Растительный покров экспериментального участка характеризуется:

- преобладанием тростниково-осоковых (*Phragmites australis*, *Carex elata*, *C. lasiocarpa*) сообществ и тростниковых (*Phragmites australis*) зарослей с участками, закустаренными ива-

ми (*Salix cinerea*, *S. myrsinifolia*, *S. pentandra*, *S. rosmarinifolia*), занимающих большую часть территории тестового участка;

- значительным зарастанием модельного участка тростником;

- локальным зарастанием ивами (*Salix cinerea*, *S. myrsinifolia*, *S. pentandra*, *S. rosmarinifolia*).

По результатам исследований, разовое кошение не приводит к существенной трансформации структуры фитоценозов исследуемого низинного болота. Оценка различий видового состава с использованием коэффициентов флористической общности Сьеренсена (K_{S1}) и Чекановского (K_{S2}) (Лебедева, 1999), показала, что после таких разовых мероприятий флористическое ядро растительных сообществ на кошенном участке сохраняется (Табл. 1): K_{S1} спустя 1 год после выкашивания по отношению к контролю составляет 0,79 (границы слабой контрастности $K_{S1} > 0,55$), коэффициент процентного сходства (K_{S2}) – 0,69.

Таблица 1. Показатели флористической общности растительных сообществ на постоянных пробных площадях тестового участка «Званец-5»

Сравниваемые пары фитоценозов	Коэффициенты общности	
	Сьеренсена (K_{S1})	Чекановского (K_{S2})
ППП № 5–1* – ППП № 5–2**	0,79	0,69

Примечания. ППП – постоянная пробная площадь; * – кошенный участок, ** – некошенный участок; при интерпретации результатов использована следующая градация контрастности: $K_s < 0,35$ – резкие границы, 0,35–0,45 – хорошие, 0,46–0,55 – довольно четкие, $>0,55$ – слабые.

Основные перестройки структуры сообществ происходили за счет изменения фитоценотической значимости видов-доминантов (Табл. 2). В частности, при выкашивании:

- статистически достоверно установлено, что проективное покрытие тростника (*Phragmites*

australis) в 2,1 раза ниже на кошенном участке относительно контроля ($t_{\text{факт}} = 6,28 > t_{05} = 2,05$);

- наблюдается существенно ($t_{\text{факт}} = 3,51 - 7,45 > t_{05} = 2,05$) большее обилие видов-индикаторов травостоя низинных болот (*Carex elata*, *C. lasiocarpa*) на кошенном участке;

- существенно изменяется структура ДКР за счет того, что после его удаления происходит уменьшение количества древесных видов растений (48,6 тыс. экз./га в контроле > 6 тыс. экз./га в эксперименте);

- проведенные мероприятия способствовали перестройке структуры ДКР: некоторые виды-доминанты выпали из состава фитоценоза (*Salix rosmarinifolia*, *S. pentandra*) (Табл. 3).

Таблица 2. Оценка достоверности различий проективного покрытия видов-доминантов растительных сообществ на постоянных пробных площадях тестового участка «Званец-5»

Виды	Значение t-критерия в сравниваемой паре фитоценозов ($t_{05}=2,05$)	Виды	Значение t-критерия в сравниваемых парах фитоценозов ($t_{05}=2,05$)
<i>Carex elata</i>	7,45	<i>Thelypteris palustris</i>	2,51
<i>Phragmites australis</i>	6,28	<i>Calliergonella cuspidata</i>	7,38
<i>Carex lasiocarpa</i>	4,28		

Таблица 3. Структура древесно-кустарникового яруса на постоянных пробных площадях проектной территории «Званец»

ЭПР–ППП	Порода	Количество стволов	
		тыс. шт/га	h_{cp} , м
Разовое кошение (ППП № 5–1)	<i>Salix cinerea</i>	6,0	0,76
	Всего:	6,0	0,76
Контроль (ППП № 5–2)	<i>Salix cinerea</i>	14,0	0,59
	<i>Salix rosmarinifolia</i>	28,6	0,56
	<i>Salix pentandra</i>	6,0	0,57
	Всего:	48,6	0,57

Примечания. га – гектар, ППП – постоянная пробная площадь, тыс. – тысяча, шт – штук, h – высота.

Изменение видового богатства (RS) фитоценозов после проведенных мероприятий не имело четко выраженного тренда. Однако более детальная оценка видового разнообразия с использованием ряда стандартных индексов Шеннона (H), доминирования (D), Симпсона (1-D) показывает, что в первый год после выкашивания наблюдается увеличение видового разнообразия и усложнение вертикальной структуры фитоценозов (Табл. 4).

Значения меры выравненности обилия видов в растительных сообществах (E) в первый вегетационный период после выкашивания имеет тенденцию увеличения, что может свидетельствовать о начале демулационной (восстановительной) фазы сукцессии. Вместе с тем следует отметить, что эффекты изменения видового разнообразия не являются статистически достоверными (при $p = 0,05$): $Ht_{факт} = 1,57$, $p = 0,11$; $Dt_{факт} = 1,57$, $p = 0,13$ (Табл. 5).

Таблица 4. Показатели видового разнообразия растительных сообществ на постоянных пробных площадях тестового участка «Званец-5»

Индекс	Контроль (ППП № 5–2)	Разовое кошение (ППП № 5–1)
Видовое богатство (RS / 100 м ²)	28	28
Индекс доминирования (D)	0,17	0,25
Индекс Симпсона (1-D)	0,83	0,75
Индекс Шеннона (H)	2,22	1,84
Мера выравненности видов (E)	0,33	0,23

Таблица 5. Сравнение показателей разнообразия в парных сообществах (выкашивание – контроль) по t-критерию

Показатель	Шеннона (H)	Доминирования (D)
Значение индекса	2,22/1,84	0,14/0,25
t-критерий	1,57	1,51
df	89,5	124,4
p	0,11	0,13

Анализ динамики количества и биометрических показателей растений тростника – индикатора эффективности выполненных мероприятий – показал, что отчуждение травостоя при скашивании приводит к снижению биомассы живого тростника в 1,8 раза. Наблюдения не являются статистически достоверными ($t_{\text{факт}} = 1,10 < t_{05} = 2,78$), но прослеживаются как хорошо выраженная тенденция.

После выкашивания тростника на данном эколого-ценотическом профиле (ЭПР) (Табл. 6) наблюдается следующее:

- количество стволов живого тростника существенно не различается: 24 шт/м² (эксперимент), 23 шт/м² (контроль);

- различаются биометрические показатели – высота растений живого тростника на контрольном участке выше, чем на кошенном: $83,4 \pm 4,5$ (эксперимент) < $96,8 \pm 4,6$ см (контроль), $t_{\text{факт}} = 2,08 > t_{05} = 2,05$;

- диаметр стеблей тростника на кошенном участке увеличивается относительно контроля ($0,34 \pm 0,02$ см в эксперименте и $0,28 \pm 0,02$ см в контроле), $t_{\text{факт}} = 1,77 < t_{05} = 2,05$;

- снижается количество сухого тростника: 0 (эксперимент) < 11 шт/м² (контроль), $t_{\text{факт}} = 3,66 > t_{05} = 2,78$.

Таблица 6. Качественные и количественные характеристики тростника на пунктах мониторинга ЭПР «Званец-5»

ЭПР–ППП	Фактор воздействия	Тростник (живой)				Тростник (сухой), количество, шт/м ²
		количество, шт/м ²	h, см / d, см			
			M±m	min	max	
5–1	кошение	24	$83,4 \pm 4,5 / 0,34 \pm 0,02$	$29 / 0,2$	$150 / 0,5$	0
5–2	контроль	23	$96,8 \pm 4,6 / 0,28 \pm 0,02$	$25 / 0,2$	$120 / 0,48$	11

Примечания. ППП – постоянная пробная площадь, шт – штук, ЭПР – эколого-ценотический профиль, d – диаметр, h – высота, M – среднее значение, m – ошибка среднего значения, min – минимальное значение, max – максимальное значение.

Таким, образом, в результате разового кошения участка низинного болота сохраняется флористическое ядро фитоценоза, достоверных различий в изменении видового разнообразия не выявлено. Важно отметить, что проективное покрытие *Phragmites australis* после кошения ($4,8 \pm 0,3\%$)

ниже относительно контроля ($10,0 \pm 0,7\%$). Количество *P. australis* идентичное в контроле и на кошенном участке, однако растения на скошенном участке ниже, при этом диаметр стебля растений увеличивается. Число древесных видов после удаления меньше относительно контроля.

1. Лебедева Н.В., Дроздов Н.Н. Биоразнообразие и методы его оценки. М.: Издательство Московского университета, 1999. 58с.
2. Методические рекомендации по повышению экологической эффективности мероприятий по управлению экосистемами низинных болот / Д. Г. Груммо [и др.] ; НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам ; Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси. – Минск, 2022. 44 с.

СООБЩЕСТВО ГРИБОВ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ: ОТ КЛАССИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ К АНАЛИЗУ ТОТАЛЬНОЙ ДНК

FUNGAL COMMUNITIES OF RAISED BOGS: FROM CLASSIC OBSERVATION TO METABARCODING

Н.В. Филиппова, Е.А. Звягина, Т.Ф. Ишманов, И.В. Филиппов
NV Filippova, EA Zvyagina, IF Ishmanov, IV Filippov

Югорский государственный университет, (г. Ханты-Мансийск, Россия)
 e-mail: filippova.courlee.nina@gmail.com

Изучение сообщества грибов торфяных болот началось с постулата о стерильности торфяных почв и как следствие низкой скорости разложения субстратов и накопление торфа. Долгое время для описания видового состава и функциональных характеристик использовался микробиологических посевов, дополненный непосредственным наблюдением плодоношений макромицетов и других высших грибов (Thornapp, 2006; Rydin et al., 2006; Myers, 2012). Оба метода имеют ограничение в описании скрытого разнообразия не культивируемых и не плодоносящих групп грибов. В последние десятилетия с развитием возможностей секвенирования появляются данные об анализе сообществ грибов торфяных болот методом метабаркодинга (секвенирования тотальной ДНК). Все три подхода в совокупности должны привести к наиболее полному описанию состава и структуры грибного сообщества.

Изучение видового состава грибов верхового болотного массива «Мухрино» началось с классического наблюдения плодоношения микромицетов и аксомицетов на опаде листьев. Исследования были дополнены выделением в чистую

культуру и ревизией сообщества дрожжей. Были получены сведения о видовом составе лишайников. Таким образом, составлены списки видов основных групп для последующей верификации и сравнения с молекулярными данными (Filippova et al., 2024b).

Летом 2022 и 2023 годов были проведены отбор проб для секвенирования тотальной ДНК грибов на верховом болотном массиве «Мухрино». Объектом исследования были четыре функциональные группы: сообщество в торфе (на поверхности), сообщество в глубине торфяной залежи (в стратиграфической колонке), грибы на опаде болотных растений, грибы микоризных окончаний болотных деревьев, и грибы древесных субстратов. Отбор проб производится так, чтобы охватить разные местообитания, растения – хозяева, сезон и разнообразие микро-условий. В ходе отбора проб, хранения, и выделения тотальной ДНК, проводили серию экспериментов для оценки оптимальных параметров.

Всего отобрано 210 проб с указанными в таблице 1 параметрами среды и экспериментальных условий (табл. 1).

Таблица 1. Типы субстратов, параметры окружающей среды и экспериментальных условий для секвенирования тотальной ДНК грибов верховых болот на болотном массиве «Мухрино»

Тип субстрата	Торф с поверхности	Глубинный торф	Опад растений	Древесный субстрат	Микоризные окончания
Параметры хранения	Лиофилизация	Лиофилизация	Заморозка, затем простая сушка	Сушка	20 шт заморозка, 20 шт лиофилизация
Параметры гомогенизации	Пестик, ступка + микропестик и ручной гомогенизатор	Пестик, ступка + микропестик и ручной гомогенизатор	Гомогенизатор + микропестик и ручной гомогенизатор	Сверло для получения опилок + микропестик и ручной гомогенизатор	Микропестик и ручной гомогенизатор
Параметры отбора пробы из общего образца	6 единичных образцов по 0,25 гр + 26 сборных образцов по 5 гр, затем отбор 0,05 гр	36 единичных образцов по 15 гр, затем отбор по 0,05 гр	28 сборных образцов по 5 гр, затем отбор 0,05 гр	28 сборных образцов по 2 гр, затем отбор 0,05 гр	40 сборных образцов по 5 гр, затем отбор 0,05 гр

Продолжение таблицы 1

Реплики экстракции	8 образцов экстрагировались дважды				
Пространственные реплики	3 образца на расстоянии 500 м	2 колонки в каждом местообитании (гряда, мочажина)	3 образца на расстоянии 500 м		10 образцов на расстоянии 10 м
Географические реплики	1 локалитет	1 локалитет	1 локалитет	1 локалитет	2 локалитета
Глубина торфа	5 глубин	20 глубин от -150 до -800 см			
Местообитания	2 местообитания	2 местообитания			
Растение - хозяин	6 видов сфагновых мхов		2 местообитания	3 вида древесины	2 вида
Сезон	4 даты экстракции	1 дата экстракции	3 даты экстракции	10 дат экстракции	2 даты экстракции
Всего проб	46	36	28	60	40

Полученные пробы хранили в морозильной камере до момента экстракции тотальной ДНК. Для гомогенизации субстрата использовали лиофильную сушку или простую сушку с последующим измельчением в ступках или в гомогенизаторе. Выделение тотальной ДНК проводили на базе молекулярно-генетической лаборатории ЮГУ согласно инструкциям производителя (SileksMagNA, <https://sileks.com/>). Секвенирование тотальной ДНК проводили в сторонних компаниях (<https://evrogen.ru/> и <https://www.syntol.ru/>). Для секвенирования был выбран регион ITS2 ядерной рибосомальной ДНК с помощью праймеров fITS7: 5'-GTGARTCATCGAATCTTTG-3' и ITS4: 5'-TCCTCCGTTATTGATATGC-3' (White et al. 1990, Ihrmark et al. 2012). В результате секвенирования получено около 40 млн прочтений фрагментов тотальной ДНК грибов, от 1,5К до 250К ридов на один образец.

Полученные последовательности обрабатывались с использованием QIIME2 (Quantitative Insights Into Microbial Ecology 2, версия 2023.9). Сырые чтения (архивы FastQ и таблица мета-данных) были загружены в NCBI Sequence Reads (номер биопроекта PRJNA1007262) и представлены в виде обработанной матрицы OTU на портале GBIF (Filipova et al., 2024a).

Анализ сиквенсов выявил общее количество 1609 операционных таксономических единиц (OTUs), классифицированных до 686 видов, 496 родов, 246 семейств, 89 отрядов, 33 классов, 9 фил и одного царства на уровне сходства 99%. Примерно 47% таксонов были определены до уровня вида, 22% – до уровня рода, а остальные – до более высоких таксономических уровней (табл. 2).

Таблица 2. Таксономическая структура, полученная в результате анализа данных метабаркодинга болотных субстратов

	Kingdom	Phyla	Class	Order	Family	Genus	Species
Число таксонов	1	7	30	86	223	423	471
Число OTU, определенных до этого уровня	34	59	86	165	148	353	764
Процент OTU, определенных до этого уровня	2%	3%	5%	10%	9%	22%	47%

Для одной из хорошо изученных классическим методом наблюдения групп, агарикоидных базидиомицетов, кроме машинного таксономического анализа, была применена курируемая классификация полученных в результате метабаркодинга сиквенсов. Обе классификации показали 100% сходство на таксономических уровнях класса, отряда, семейства и рода. Однако на уровне вида 23% (27 из 118 операционных единиц (OTU)) в результате курируемой классификации были присвоены другие названия: 9 видов были пе-

реопределены как другие виды в связи с неверным определением, имеющим место в базе OTU UNITE, 14 таксонов улучшили идентификацию до уровня вида, и 4 вида были сведены к уровню рода, в связи с неверным определением, имеющим место в базе OTU UNITE. После курируемой классификации было проведено сравнение выявленного видового состава классическим методом и метабаркодингом в рамках строго определенной группы (агарикоидные базидиомицеты). Сравнение показало, что около трети (36 видов)

выявлены обоими методами, в то время как 59 видов были уникальными для традиционного подхода, и 44 были выявлены только с использованием eDNA. Курируемая классификация и анализ сходства других групп будут продолжены по мере накопления данных об этих группах в будущем.

Анализ структуры сообществ, выполненный для всех проб методом ординации, показал наличие четырех выделяющихся облаков точек, соответствующих основным типам субстратов:

поверхностный торф, древесина, опад растений, и глубинный торф (рис. 1). В свою очередь, пробы из каждой группы объединяются в свои подгруппы по другим параметрам среды (например, пробы из опада растений – по видам хозяев). Полученные результаты свидетельствуют о достоверности полученных данных о видовом разнообразии и структуре сообществ грибов методом выделения тотальной ДНК. Анализ данных структуры сообществ продолжается и поможет оптимизировать параметры отбора и обработки проб, в том числе.

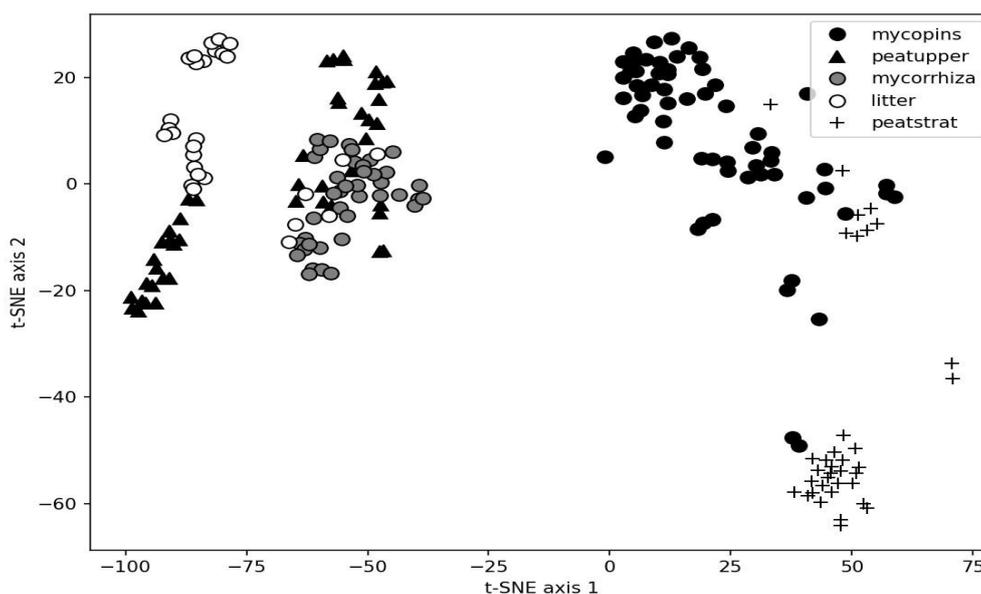


Рисунок 1. Результат ординации проб тотальной ДНК, выделенной из основных субстратов верхового болота «Мухрино»: mycopins – древесина, peatupper – поверхностный торф, mycorrhiza – микоризные окончания, litter – опад болотных растений, peatstrat – глубинный торф.

Субсидия из федерального бюджета на выполнение государственного задания "Молекулярно-генетические методы в изучении и оценке состояния биоразнообразия Северных регионов (FENG-2024-0003)" №1023041300017-6-1.6.4 от 13.03.2024.

1. Filippova N., Zvyagina E., Ishmanov T. 2024a. DNA-based occurrence dataset on peatland fungal communities studied by metabarcoding in Northwestern Siberia. Version 1.10. Yugra State University Biological Collection (YSU BC). Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/s2pkfk> accessed via GBIF.org on 2024-05-02.
2. Filippova N., Zvyagina E., Rudykina E.A., Ishmanov T.F., Filippov I.V., Bulyonkova T.M., Dobrynina A.S. 2024b DNA-based occurrence dataset on peatland fungal communities studied by metabarcoding in north-western Siberia. Biodiversity Data Journal 12: e119851. <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e119851>
3. Myers B., Webster K.L., Mclaughlin J.W., Basiliko N. 2012. Microbial activity across a boreal peatland nutrient gradient: the role of fungi and bacteria. *Wetlands Ecol Manage* 20(2): 77–88. <https://doi.org/10.1007/s11273-011-9242-2>
4. Rydin H., Jeglum J.K., Hooijer A. 2006. Diversity of life in peatlands: fungi and microorganisms. In: *The biology of peatlands*. Oxford; New York: Oxford University Press. p. 20–24.
5. Thormann M. 2006. The Role of Fungi in Boreal Peatlands. In: *Boreal Peatland Ecosystem*. Berlin: Springer. p. 101–123.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАСЕЙНА БОЛОТА БЕРКАЗАН-КАМЫШ

THE RESULTS OF THE ANALYSIS OF THE CLIMATIC CHARACTERISTICS OF THE BERKAZAN-KAMYSH SWAMP BASIN

А.О. Фирстов

A.O. Firstov

Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа, Россия)

e-mail: alexfirstov777@gmail.com

Торфяник Берказан - Камыш располагается в Давлекановском административном районе Республики Башкортостан, на особо охраняемой природной территории Природный парк «Аслы-Куль». Общая площадь болота – около 900 га (Мартыненко В.Б. ...2017).

Исследуя имеющиеся литературные источники по болоту Берказан-Камыш было обнаружено, что за годы изучения так и не была составлена климатическая характеристика данного объекта. Автором была поставлена задача проанализировать имеющиеся фондовые данные Башкирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (далее по тексту – БашУГМС) по ближайшим метеостанциям, которые окружают бассейн данного болота, а именно: Аксаково, Буздяк, Раевский, Туймазы, Уфа-Дёма, Чишмы. Непосредственных наблюдений за климатическими параметрами на болоте Берказан-Камыш не осуществляется в постоянном режиме, помимо тех периодов, когда там проводятся полевые исследования (Ильясов, 2017).

В данной работе автор останавливается на ретроспективном анализе изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на территории водосборного бассейна болота Берказан-Камыш. В ходе анализа было использовано два способа проинтерполировать данные: построением карты методом обратно взвешенных расстояний (далее по тексту – ОВР), а также только с использованием формулы (Котов А.А., 2006), которая позволяет обойти построение многочисленных картосхем в GIS программах.

В работе были проанализированы следующие показатели: среднегодовая и месячная температуры воздуха и соответствующие им коэффициенты наклона линии тренда (далее по тексту – КНЛТ), годовая и сезонная суммы атмосферных осадков и их КНЛТ. Периоды анализа были выбраны с учётом рекомендаций ВМО (Комиссия по климатологии..., 2014), а именно: с 1961 по 1990 гг., 1981-2010 и 1991-2020 годы.

По результатам работы можно сделать несколько выводов:

Первый и наиболее значимый вывод для данной работы: значения, полученные путём проведения поля ОВР-интерполяции в QGIS, и формула, используемая для расчёта соответствующего параметра к центру бассейна практически идентичны, и различаются от 0,0 % до 1,67 % и от 0,0 % до 2,49 % для средних температур и КНЛТ, соответственно. Значения сумм атмосферных осадков отличаются менее чем на 2,5 % (для значений без поправок) и менее чем на 1 % (для значений с поправкой). В связи с этим выводом, мы можем применять данную формулу для формирования полной климатической характеристики.

Второй вывод, что по сравнению с базовым метеорологическим периодом (1961-1990 гг.), за последнюю стандартную климатологическую норму (1991-2020 гг.) увеличилась среднегодовая, январская и июльская температура воздуха, и при этом уменьшается годовая сумма осадков, при увеличении осадков в холодный и уменьшении осадков в тёплый периоды. Это также подтверждается и по данным КНЛТ.

1. Ильясов Д.В., 2019, Современное состояние осушенного болотного массива в условиях лесостепи (на примере урочища Берказан-Камыш, Республика Башкортостан): диссертация ... кандидата Биологических наук: 03.02.08. 116 с.
2. Комиссия по климатологии. Шестнадцатая сессия. Гейдельберг 3-8 июля 2014 г. Сокращённый окончательный отчёт с резолюциями и рекомендациями. ВМО-№ 1137, 2014. 80 с.
3. Котов А.А., 2006, Интерполяция поверхностей и анализ пространственных данных в геоинформационных системах для целей представления и пространственного анализа района изысканий в АСУТП установления полосы

варьирования трассы автомобильной дороги // Транспортное строительство. Изд-во: Вестник МАДИ (50 ГТУ), вып. 6. С. 50-56.

4. Мартыненко В.Б., Бикбаев И.Г., Мулдашев А.А. и др., 2017, Биоразнообразие болот Республики Башкортостан // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Пятого международного полевого симпозиума, Ханты-Мансийск, 19–29 июня 2017 года. Ханты-Мансийск: Национальный исследовательский Томский государственный университет. С. 31-33.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ

USING HIERARCHICAL LANDCOVER CLASSIFICATION TO UPSCALE FUNCTIONAL CHARACTERISTICS IN PEATLAND ECOSYSTEMS

А.Д. Шангина^{1}, Т.Ю. Минаева², О.В. Чередниченко³.*
A. D. Shangina¹, T.Yu. Minayeva², O.V. Cherednichenko³.

^{1,3} Институт лесоведения РАН (с. Успенское, Московская область, Россия)

² Care for Ecosystems UG (Гёрлиц, Германия)

*e-mail: zhukova1995alena@gmail.com

Проекты по вторичному обводнению и восстановлению торфяников являются предметом отчетности по смягчению последствий изменения климата и адаптации к ним. Вклад болотных экосистем в регулирование климата и буферизацию последствий изменения климата общепризнаны. Проекты по восстановлению болот, их сохранению или управлению болотными экосистемами становятся всё более широко распространёнными в качестве климатических. Отчетность в климатических проектах строится на применении методологии GEST, при которой классам наземного покрова придаются значения коэффициентов выбросов парниковых газов (ПГ), а сокращение выбросов ПГ, т.е. смягчение изменений климата, оценивается или прогнозируется на основе отслеживания или прогнозного моделирования пространственных изменений в растительном покрове. Те же классы наземного покрова могут быть использованы для оценки способности экосистем к адаптации. Таким образом метод GEST предполагает индикацию значений параметров смягчения и адаптации к изменениям климата на основе биофизических характеристик классов наземного покрова. Однако единица картографирования, соответствующая классу наземного покрова, часто по площади больше, чем минимальная пространственная единица, где биофизические характеристики однородны. Прямое измерения биофизических переменных на уровне единицы картографирования невозможно из-за высокой степени неоднородности, которая влечет за собой неопределённость. Для решения этой проблемы был предложен протокол, использующий иерархическую классификацию ландшафтов. Для целей визуального картографирования ландшафтных единиц различного пространственного уровня определяется соответствие с единицами растительного покрова.

Были использованы следующие пары ландшафтных единиц и единиц растительного покрова соответственно: нанотоп/микроформа - микроценоз; фация - фитоценоз/комплекс фитоценозов; микроландшафт - группа фитоценозов; мезоландшафт - тип растительности.

Ландшафтные единицы более высокого уровня характеризуются определённым разнообразием и пространственным распределением в их границах ландшафтных единиц следующего по иерархии уровня – вплоть до низшего уровня. Например, определённый тип болотного массива (мезоландшафт) характеризуется определённым набором и пространственным распределением болотных участков (микроландшафт). В свою очередь для болотного участка характерны типы фаций и их пространственное соотношение. Биофизические характеристики получают для тех уровней, на которых они наиболее однородны – как правило — это наименьшая пространственная единица – нанотоп или микроформа.

Затем эта информация используется для присвоения ландшафтным единицам различного уровня биофизических характеристик на основе доли их представленности в границах более высокой по иерархии единице. Данные характеристики могут включать коэффициенты выбросов ПГ, запасы углерода, насыщенность водой, индексы биоразнообразия или любые другие соответствующие параметры. Протокол был применен для ретроспективного и прогнозного моделирования изменений экосистемных функций в ходе естественной динамики на верховом болоте "Старосельский мох" и восстановительной динамике на бывшем участке добычи торфа на торфяном месторождении "Оршинский мох", которые расположены в Тверской области (северо-запад европейской части России). Протокол был применен

для присвоения единицам картографирования коэффициентов выбросов ПГ, запаса углерода, видового богатства растений, уровня болотных вод и насыщенности водой субстрата. В качестве следующего шага планируется независимое тестирование протокола для прогнозирования коэффициентов выбросов ПГ путем сравнения

прямых измерений, полученных методом пульсационных измерений с расчётными данными, полученными при экстраполяции измерений потоков методом камер на уровень болотного участка с использованием иерархической классификации ландшафтов и соответствующих классов растительного покрова.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЯДА РЕДКИХ И ОХРАНЯЕМЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ ОЛИГОТРОФНЫХ И МЕЗОТРОФНЫХ БОЛОТ В ПРЕДЕЛАХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХМАО-ЮГРЫ

FEATURES OF DISTRIBUTION OF A NUMBER OF RARE AND PROTECTED PLANT SPECIES IN THE TERRITORIES OF OLIGOTROPHIC AND MESOTROPHIC MIRES WITHIN OIL FIELDS OF KHMAO-YUGRA

Е.А. Шишконокова

E.A. Shishkonakova

Почвенный институт им. В.В. Докучаева (г. Москва, Россия)

E-mail: shishkonakova_ea@esoil.ru

Проблема охраны редких и исчезающих видов растений приобрела в настоящее время особую актуальность в связи с экстенсивным развитием нефтегазодобывающей отрасли, приводящим к значительному росту площади земель с антропогенно измененным почвенно-растительным покровом. В ходе полевых работ, проведенных на территории округа в период 2003-2023 гг., были выявлены новые местонахождения редких и требующих охраны видов растений, включенных в Красную книгу ХМАО-Югры и ее приложение (2013). Значительная часть новых местообитаний редких видов была обнаружена в пределах действующих месторождений на участках антропогенно трансформированных олиготрофных и мезотрофных болот (Шведчикова и др., 2012).

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

К видам со стратегией первого типа, поселяющимся непосредственно на торфе, чей ареал обитания существенно расширился под влиянием техногенных факторов, можно отнести *Thelypteris palustris* L. Его успешное распространение связано с подтоплением, а также увеличением трофности вследствие антропогенной эвтрофикации торфяных почв олиготрофных и олиго-мезотрофных болот. Одной из интересных черт восстановительных процессов, происходящих на рекультивированных поверхностях зарастающих засоленных торфяников, является активное поселение печеночников, не испытывающих в этом

случае сколько-нибудь значительной конкуренции со стороны сфагновых мхов. В их числе был неоднократно отмечен *Heterogemma laxa* (Jørg.) Konstant. & Vilnet. К видам, не получившим широкого распространения в трансформированных местообитаниях, но тем не менее нередко произрастающим на техногенно-нарушенных участках болот относятся *Trichophorum alpinum* (L.) Egor., *Dactylorhiza maculata* (L.) Soó, *D. incarnata* (L.) Soó, *Hammarbya paludosa* (L.) O. Kuntze. Часть видов, включенных в Красную книгу ХМАО-Югры и отмеченных в границах массивов торфяных болот, предпочитает селиться на техногенных объектах, отсыпанных минеральным субстратом – насыпях, бермах дорог, рекультивированных поверхностях шламовых амбаров. Среди них *Epipactis palustris* (L.) Crantz, *Lycopodiella inundata* (L.) Holub, *Psilopilum cavifolium* (Wilson) I. Hagen. Отдельные виды демонстрируют способность поселяться как на минеральных, так и на антропогенно засоленных или эвтрофицированных торфяных субстратах. В эту группу входят *Triglochin maritima* L. и *Malaxis monophylla* (L.) Sw.

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

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

1. Красная книга Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: животные, растения, грибы / Отв. ред. А.М. Васин, А.Л. Васина. Екатеринбург: Изд-во Баско, 2013. 460 с.
2. Шведчикова Н.К., Аветов Н.А., Шишконокова Е.А. Новые местонахождения редких растений на территории ХМАО-Югры // *Turczaninowia*. 2012. Т. 15. № 1. С. 45-50.
3. Remm L., Lõhmus A., Leibak E., Kohv M., Salm J-O, Lõhmus P., Rosenvald R., Runnel K., Vellak K., Rannap R. Restoration dilemmas between future ecosystem and current species values: The concept and practical approach in Estonian mires // *Journal of Environmental Management*. 2019. V.250. 109439.

АНАТОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИСТЬЕВ ВЕЧНОЗЕЛЕННЫХ КУСТАРНИЧКОВ СФАГНОВЫХ БОЛОТ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООВОГО ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА**ANATOMICAL FEATURES OF LEAVES OF EVERGREEN SHRUBS IN SPHAGNUM BOGS UNDER THE THERMAL INFLUENCE OF A GAS FLARE**

**Э.Р. Юмагулова, А.В. Стасив, Г.С. Зайнетдинова, Т.Д. Платыч, Р.Н. Юмагулов
E.R. Yumagulova, A.V. Stasiv, G.S. Zainetdinova, T.D. Platych, R.N. Yumagulov**

Нижевартковский государственный университет (г. Нижневартовск, Россия)

E-mail: elvirau2023@mail.ru

В условиях теплового влияния газового факела по сжиганию попутного нефтяного газа, у сосудистых растений сфагновых болот, изменяется структура фотосинтетического аппарата на разных уровнях его организации, что связано с адаптационными процессами.

Анатомические особенности листьев растений верховых болот среднетаежной зоны в условиях влияния нефтедобывающей промышленности изучены фрагментарно.

Целью нашего исследования являлось изучение анатомических особенностей листьев вечнозеленых кустарничков сфагновых болот в условиях теплового влияния газового факела.

Исследование проводили в июне – июле 2022 - 2023 гг. в двух ценопопуляциях - *Oxycoccus palustris* Pers., *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench в болотных фитоценозах на пробных площадках расположенных на разном расстоянии от ствола газового факела: в 100 м (опыт) и в 500 м (контроль). Сообщество сфагнового болота представлено сосново-кустарничково-сфагновой ассоциацией, расположено на территории Покачевского нефтяного месторождения в 100 км от г. Сургут. Антропогенная нагрузка на опытном участке, обусловлена мощным, тепловым и иссушающим воздействием факела на растительные сообщества болота.

Срезы листьев для исследования проводили с использованием замораживающего микротомы МЗ-3 (Россия), изучение анатомических параметров с помощью микроскопа Primo Star (Carl Zeiss, Германия) и цифрового видео микроскопа высокого разрешения Nirox KH-7700 (Япония), обработку данных - с использованием регрессивного и корреляционного анализ с доверительной вероятностью 95%.

Анализ физико-химических параметров среды показал, что газовый факел значительно влияет на свойства почвенной и воздушной сре-

ды. При приближении к факелу в ряду 500 м → 100 м: повышаются значения температуры атмосферного воздуха в среднем на 4°C и влажности атмосферного воздуха на 15%, температуры торфогрунта на 3°C; снижается уровень освещенности, сдвигается значение pH торфогрунта (от 2,5 до 3,8).

Установлено, что для изученных видов растений характерен дорсовентральный тип строения мезофилла: хорошо выражены два слоя палисадного мезофилла, толщина которого различалась достоверно у *Oxycoccus palustris* Pers. и не различалась у *Andromeda polifolia* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench. На опытном участке, толщина палисадного мезофилла у *Oxycoccus palustris* Pers. снижалась на 33% по сравнению с контролем. Клетки губчатого мезофилла расположены под слоем палисадного мезофилла рыхло, в связи, с чем в листе хорошо развита система межклетников. Толщина губчатого мезофилла в листьях растений, произрастающих на опытном участке, была достоверно меньше, чем на контроле в среднем на 41% у *Oxycoccus palustris* Pers., на 14% у *Andromeda polifolia* L. и на 12% у *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench.

Согласно полученным нами данным, у изученных растений, произрастающих на опытном участке, толщина листа была достоверно меньше, чем у растений на контроле, в среднем на 43% у *Oxycoccus palustris* Pers., на 9% у *Andromeda polifolia* L. и на 5,2% у *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench. В зоне теплового влияния факела, развитие ксероморфной структуры листьев у кустарничков снижается.

Эпидермис листа у изученных кустарничков однослойный, высота клеток верхнего эпидермиса у растений на опытном и контрольном участках различались достоверно. В условиях теплового влияния факела толщина верхнего эпидермиса снижалась на 37% у *Chamaedaphne calyculata* (L.)

Moench, на 17% у *Oxycoccus palustris* Pers. и на 13% у *Andromeda polifolia* L. (табл.). На верхней стороне листа хорошо выражен слой кутикулы, толщина которой на опытном участке меньше, чем на контроле на 62% у *Oxycoccus palustris* Pers., на 41% у *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench и на 21% у *Andromeda polifolia* L. Вблизи факела происходит снижение барьерной функции эпидермы за счет уменьшения кутикулярного слоя. Толщина нижнего эпидермиса с кутикулой у всех растений на изученных участках различалась достоверно и была меньше на опытном участке, в среднем на 37%.

Таким образом, выявлены адаптивные структурные перестройки фотосинтетического

аппарата растений в условиях теплового влияния газового факела. В листьях *Oxycoccus palustris* Pers., снижались все изученные анатомические параметры. У *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench и *Andromeda polifolia* L. уменьшались все показатели, кроме толщины палисадного мезофилла, что связано с компенсаторной реакцией растений. У всех растений снижалась выраженность ксероморфной структуры листа и барьерная функция эпидермы, соответственно, за счет снижения - толщины листа и кутикулярного слоя. Снижение анатомических показателей связано с процессом адаптации, для сохранения влаги и повышения устойчивости к неблагоприятным факторам.

**Paleoecology and history
of the development
of mire ecosystems**

**Палеоэкология
и история развития
болот**

TESTATE AMOEBEA-BASED RECONSTRUCTION OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF TWO MIRES IN YENISEI SIBERIA

Gu Xiuyuan^{1,2}, Andrey N. Tsyganov², Natalia G. Mazei², Kirill V. Babeshko^{1,2}, Alexander A. Komarov³, Yuri A. Mazei^{1,2}

¹ Shenzhen MSU-BIT University (Shenzhen, China)

E-mail: gxy641948749@126.com

² Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

³ Penza State University (Penza, Russia)

Testate amoebae are commonly used as proxies for water table depth and substrate wetness in peatlands to reconstruct past hydroclimatic conditions, however some regions, including Siberia, remain under investigated in this regard. This study aims at reconstructing of hydrological regime in two permafrost mires in Yenisei Siberia, using transfer functions developed especially for this region (Gu et al., 2023). The first study site (the Igarka mire; 67.53°N, 86.63° E) is a mosaic of perennial frost mounds (4–5 m height, 50–100 m width) and flat wide hollows (200–300 m) (Novenko et al., 2024). The second site is the Malaya Graviika mire (67.48°N, 86.43 °E). The total depth of the sampled peat deposits was 845 cm and 280 cm, respectively. The age of the deposits was determined by radiocarbon ¹⁴C AMS dating (Novenko et al., 2024) and calibrated with the calibration curve 'IntCal20' (Reimer et al., 2020). The samples for testate amoeba analysis were prepared according to standard procedures without the use of chemical reagents (Booth et al., 2010) and identified according to identification guidelines (Mazei & Tsyganov, 2006; Siemensma, 2022; Tsyganov et al., 2016). Testate amoeba based hydrological reconstructions were performed and plotted using the R language environment (R Core Team, 2022) with the "rioja" (Juggins & Juggins, 2019) and "analogue" packages (Simpson et al., 2016).

The accumulation of organic sediments in the Igarka peatland began around 6350 cal yr BP, whereas the Malaya Graviyka mire is much older and was initiated only 12155 cal yr BP. In Igarka mire, a total of 61 testate amoeba taxa belonging to 25 genera were identified in the peat samples. The majority of the taxa can be considered as aquatic and moss-dwelling species. The preservation of testate amoebae in the sediments was uneven. There were two zones of low shell numbers at depths of 830–620 cm and 150–105 cm. Overall, the peat deposits can be divided into seven testate amoeba zones (TAZ): TAZ1 (860–830 cm, 6350–6260 cal yr BP) was dominated by soil dwelling taxa (reconstructed WTD

range 8.18–11.5 cm, mean 9.6 ± 1.4 cm). Zones TAZ2 (845–620 cm, 6240–5700 cal yr BP) (reconstructed WTD range 8.2–24.1 cm, mean 13.4 ± 5.7 cm) and TAZ3 (620–510 cm, 5700–5330 cal yr BP) (reconstructed WTD range 3.5–16.0 cm, mean 10.1 ± 4.9 cm) were characterized by poor preservation of testate amoeba shells that resulted in overall low counts of generally aquatic taxa. TAZ4 (510–240 cm, 5330–4540 cal yr BP) was dominated by *Sphagnum*-dwelling hydrophilous species (reconstructed WTD range 6.2–19.4 cm, mean 12.5 ± 3.1 cm). TAZ 5 (240–51 cm, 4540–2960 cal yr BP) was dominated by aquatic testate amoebae (reconstructed WTD range 3.0–17.1 cm, mean 12.1 ± 3.8 cm). TAZ6 (51–17 cm, 2960–1940 cal yr BP) was dominated by *Sphagnum*-dwelling hydrophilous species that indicates very high surface wetness of the mire (reconstructed WTD range 9.4–15.0 cm, mean 11.9 ± 2.1 cm). TAZ7 (17–0 cm, 1940 cal yr BP – present) is dominated by xerophilous taxa that indicates dry environmental conditions (reconstructed WTD range 18.2–30.8 cm, mean 23.6 ± 6.4 cm).

In Malaya Graviika, a total of 43 testate amoeba taxa from 21 genera was revealed. Most of the identified taxa are aquatic or *Sphagnum*-dwelling. Based on the species composition of testate amoebae, peat deposits can be subdivided into three testate amoeba zones (TAZ). The first zone (279–182 cm, 12155–4041 cal yr BP) was characterized by poor preservation of testate amoebae which were mostly represented by xerophilic taxa (reconstructed WTD range 2.4–24.0 cm, mean 16.9 ± 5.8 cm). In the second zone (182–65 cm, 4040–2466 cal yr BP), the proportion of hygrophilous species increased indicating greater surface wetness (reconstructed WTD range 9.0–22.0 cm, mean 13.7 ± 3.9 cm). In TAZ3 (65–0 cm, 2466 cal yr BP – the present) xerophilous taxa became dominant again indicating a reduction in the reconstructed WTD ranges to 9.6–22.0 cm, mean 20.3 ± 2.5 cm.

Overall, the variation in the local wetness based on subfossil testate amoebae strongly reflects the periods of permafrost degradation in mire.

Acknowledgements. This work was financially supported by the Russian Science Foundation (24-14-00065).

1. Booth, R., Lamentowicz, M., & Charman, D. (2010). Preparation and analysis of testate amoebae in peatland paleoenvironmental studies. *Mires and Peat*, 7 (2010/11), 1–7.
2. Charman, D. J., Hendon, D., & Woodland, W. A. (2000). *The Identification of Testate Amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in peats: Quaternary Research Association, Technical Guide no. 9 [m]*. London: Quaternary Research Association.
3. Gu X., Tsyganov, A. N. , Yushkovets, S. U., Babeshko, K.V., Chenrnyshov, V.A., Mazei, N. G., & Mazei, Y.(2023). "Pressing issues of studying the arctic and subarctic ecosystems in the context of global environment and climate change", Development of a calibration model for the reconstruction of surface wetness in permafrost peatland using testate amoebae in Central Siberia (oral presentation), Madrid, Spain, 2023 December 15-16th.
4. Hendon, D., & Charman, D. J. (1997). The preparation of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) samples from peat. *The Holocene*, 7(2), 199–205.
5. Juggins, S., & Juggins, M. S. (2019). Package 'rioja.'
6. Mazei, Y., & Tsyganov, A. N. (2006). Freshwater testate amoebae. KMK, Moscow, 302.
7. RCoreTeam. (2022). A language and environment for statistical computing. In: R Foundation for Statistical Computing.
8. Siemensma, F. J. (2022). *Microworld, world of amoeboid organisms*. World-Wide Electronic Publication, Kortenhoeft, the Netherlands.
9. Simpson, G. L., Oksanen, J., & Simpson, M. G. L. (2016). Package 'analogue.' Analogue and Weighted Averaging Methods for Palaeoecology.
10. Tsyganov, A. N., Babeshko, K. V., & Mazei, Y. A. (2016). *A guide to testate amoebae with the keys to genera*. Publishing House PGU, Penza.

HOLOCENE CARBON DYNAMICS OF PEATLANDS IN NORTHWESTERN CHINA**Haiyan Zhao^{1,2,3}, Weijian Zhou^{1,2,4,5}, Peng Cheng^{1,2,4*}, Hua Du^{1,2}**¹ The State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences (Xi'an 710061, China)² Shaanxi Key Laboratory of Accelerator Mass Spectrometry Technology and Application (Xi'an, 710061, China)³ Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research (Xi'an 710061, China)⁴ Xi'an Jiaotong University (Xi'an, 710049, China)⁵ Beijing Normal University, Interdisciplinary Research Center of Earth Sciences (Beijing, 100049, China)

Peatlands store about 1/3 of the world's total soil organic carbon (OC), making them the most important terrestrial carbon reservoirs on Earth. Understanding the mechanisms of peatland carbon deposition in response to climate change is crucial for predicting peatland carbon fate in the future. Here we provided two continuous sediment records covering the past 11.1-2.0 kyr (1 kyr = 1000 years) retrieved from Altay mountains in Northwestern China. The temporal variation of organic carbon accumulation rate (OCAR) was established and classified into four stages. Subsequently, potential responses of OCAR to climatic and environmental processes were evaluated based on Spearman's rank correlation analysis between OCAR and individual sedimentary proxies. During the 11.1-10.5 kyr, the relatively low OCAR was determined

owing to the predominant contributions of detrital influx and low terrestrial organic matters. As the temperature increased, the high OCAR was yielded during the 10.5-8.4 kyr, resulting from the high values of both sedimentary accumulation rate (SAR) and high organic carbon content (OCC). Then, the OCAR declined during the 8.4 - 4.0 kyr which proposes a potential response to the decreased SAR controlled by temperature. Correspondingly, the increased OCAR in the Late Holocene (4.0-2.0 kyr) was accompanied by an increase in SAR and dry density. In summary, our study indicates that the Holocene carbon dynamic in peatland from the Altay Mountains is mainly influenced by temperature change rather than humidity, but this situation may become more complex with the increasing global warming.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ДРЕВНЕГО ЧЕЛОВЕКА В СРЕДНЕМ ЗАУРАЛЬЕ В ГОЛОЦЕНЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПАЛЕОБОТАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА VI РАЗРЕЗА ГОРБУНОВСКОГО ТОРФЯНИКА

RECONSTRUCTION OF THE HABITAT OF ANCIENT MAN IN THE MIDDLE TRANS-URALS IN THE HOLOCENE ACCORDING TO THE RESULTS OF PALEOBOTANICAL ANALYSIS OF SECTION VI GORBUNOVSKY PEATLAND

Т.Г. Антипина¹, С. Райнхольд², А.Т. Галимов³, Н.М. Чаиркина⁴
T.G. Antipina¹, S. Reinhold², A.T. Galimov³, N.M. Chairkina⁴

¹ Ботанический сад УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

² Евразийский отдел Германского археологического института (г. Берлин Германия)

³ Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.П. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

⁴ Институт истории и археологии УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

E-mail: antanya1306@mail.ru;

Введение. Горбуновский торфяник — наиболее изученное местонахождение озерно-болотных отложений Среднего Зауралья с палеоэкологической точки зрения (Хотинский, 1977; Антипина и др., 2013; Панова, Антипина, 2013; Panova, Antipina, 2016; и др.) и в археологическом аспекте (Чаиркина, 2005, 2010; Чаиркина и др., 2017; Жилин и др., 2020 и др.). Это ключевой объект для изучения экологической истории голоцена и археологической хронологии Среднего Урала и Зауралья, вмещающий последовательность органических отложений, начиная с позднеледникового, и содержащий целый ряд многослойных торфяниковых памятников.

Скважина глубиной 4,22 м пробурена в центральной части торфомассива, вблизи археологического памятника VI Разрез (далее VI Разрез-2020). Образцы для анализов отбирались из керна через 2 см. Для определения абсолютного возраста отложений выполнен AMS-анализ 16 образцов в лаборатории Курт-Энхельхорн-Центр археометрии (CEZA), Манхейм, Германия. Калибровка дат выполнена в среде R пакет "Bchron" с использованием калибровочной кривой IntCal20 (Reimer et al., 2020), формат данных о возрасте — калиброванных лет до нашей эры (кал. л. до н. э.) и калиброванных лет назад (кал. л. н.) в соответствии с практическими задачами исследований. На основе полученных датировок построена глубинно-возрастная модель торфяной залежи в том же пакете (Haslett, 2008). Основные методы исследования: спорово-пыльцевой и ботанический анализы торфяно-сапропелевых отложений. Реконструкция палеоклиматических параметров проведена методом наилучших биоклиматиче-

ских аналогов, в сравнении пыльцевых данных VI Разреза 2020 с поверхностными пыльцевыми спектрами базы данных EMPD 2.0 (Davis et al., 2020). Радиоуглеродные даты разреза начинаются с 13226–13095 кал. л. н. (11277–11146 кал. до н. э.), т.е. с позднеледникового, и охватывают весь голоцен. Глубинно-возрастное моделирование показало неравномерную аккумуляцию торфа в течение голоцена.

Датированные археологические артефакты памятников Горбуновского торфяника, свидетельствуют о периодическом поселении здесь древнего человека с интервалами интенсивного присутствия, прерываемыми лакунами. Это подтверждается и датировкой стоянок (Чаиркина и др., 2013; Жилин и др., 2020). В целом, люди постоянно населяли эту территорию, начиная с 9-го тысячелетия до нашей эры: в эпохи мезолита, неолита, энеолита, бронзы и железного века.

Результаты и обсуждение. Спорово-пыльцевая диаграмма VI Разрез-2020 с выделенными на ней пыльцевыми комплексами и ботанический анализ вегетативных микрофоссилий отражают динамику изменений растительных сообществ как локальных, так и на окружающих пространствах. Полученные новые данные во многом согласуются с результатами исследований других разрезов Горбуновского торфяника. Непрерывная последовательность отложений, охватывающая весь голоцен, включая позднеледниковье в профиле VI Разрез-2020, частый отбор образцов и хорошее датирование отложений в сопоставлении с археологическими данными позволили более детально реконструировать динамику ре-

гиональной растительности и природной среды обитания древнего человека.

В позднеледниковье (LG) 13.5–12.7 тыс. кал. л. н. (11.5–10.7 тыс. кал. л. до н. э.) Горбуновский торфяник представлял водоем, в котором откладывались озерные глины. Окружающие озеро ландшафты были, в основном, безлесными, большая часть которых была покрыта ерниковыми сообществами из кустарниковых березок (*Betula nana* L.), а также ив (*Salix* sp.), ольховника (*Alnus fruticosa* (Rupr.) Pouzar), и травяными сообществами. Редкая древесная растительность представлена лиственницей (*Larix sibirica* L), елью (*Picea obovata*) и березой (*Betula*). Судя по динамике кривых древесных и кустарниковых растений на пыльцевой диаграмме, этот период отличался резкими сменами потеплений и похолоданий. Поселения этого времени на берегах Горбуновского озера не обнаружены.

С потеплением в ландшафтах увеличиваются площади елово-лиственничных редколесий, ерниковые сообщества сокращаются. В водоеме начинают аккумулироваться сапропели. В нашем разрезе этот период датируется временем от 12.7 до 11.7 тыс. кал. л. н. (10.7–9.7 тыс. кал. л. до н. э.), т.е. поздним дриасом, что не совсем соответствует представлениям о сухих и холодных условиях этого времени. Вопрос требует дополнительного исследования.

Растительность раннего голоцена (Greenlandian stage, 11.7–8.2 тыс. кал. л. н.) представлена лиственнично-еловыми лесами с травяным покровом в первую половину (11.7–11.0 тыс. кал. л. н.); берёзовыми и сосново-берёзовыми во вторую. Климат был умеренно теплым. В озере накапливались сапропели. В период 10.9–9.5 тыс. кал. л. н. (8.9–7.5 тыс. кал. до н.э.) на берегах Горбуновского палеозера появляются стоянки эпохи раннего, среднего и позднего мезолита (памятник Береговая 2) (Зарецкая и др., 2014).

В среднем голоцене (Northgrippian stage, 8.2–4.2 тыс. кал. л. н.) доминирующей породой в лесах на восточном склоне Среднего Урала и Зауралья становится сосна.

На рубеже раннего и среднего голоцена, около 8.2 тыс. кал. л. н. по палеоклиматическим показателям проявляется похолодание между 8.25–8.15 тыс. кал. л. н. (6250–6150 кал. до н. э.).

После события 8.2 тыс. л. н., которое знаменует собой начало неолита, в период с 8.2 по 7.5 тыс. кал. л. н. (6.2–5.7 тыс. кал. л. до н. э.) окружающая лесная растительность представлена березово-сосновыми лесами с примесью ели и некоторых широколиственных древесных растений. Климатические условия были умеренно влажными и теплыми, хотя экстремально высокие температуры зафиксированы около 7.65 тыс.

кал. л. н. (~5.6 тыс. кал. л. до н.э.). Озерные отложения этого времени представлены темно-оливковым сапропелем.

Следующий период с 7.5 до 5.7 тыс. кал. л. н. (~5.5–3.7 тыс. кал. л. до н. э.) – время распространения елово-сосновых лесов с примесью березы, пихты (*Abies*), ольхи (*Alnus*) и широколиственных древесных растений (*Tilia*, *Quercus*, *Ulmus*). В этот период климатическая обстановка и природные условия были относительно стабильные, но 7.3 тыс. кал. л. н. (5.3 тыс. кал. л. до н. э.) начинается зарастание водоема в центральной части акватории. Отложения представлены осоково-пушицевым торфом. К этому времени относятся исследованные памятники эпохи энеолита, большинство из них расположены в центральной части Горбуновского торфяника, вблизи островов. Последние столетия этого этапа связаны с деревянными постройками эпохи ранней бронзы.

Период от 5.7 до 4.2 тыс. кал. л. н. (~3.7–2.2 тыс. кал. л. до н. э.) отличается наибольшим развитием еловых лесов с участием пихты и широколиственных древесных растений. Теплые и умеренно влажные природные условия этого времени характеризуют заключительную фазу климатического оптимума среднего голоцена.

Поздний голоцен (Meghalayan stage, ~4.2–0 тыс. кал. л. н., или ~2.2–0 тыс. кал. л. до н.э.). Краткое сухое похолодание около 4.2 тыс. кал. л. н. привело к изменению лесной растительности: уменьшилось участие ели и увеличилось – березы и пихты. Преобладали елово-сосновые леса с примесью пихты, березы и широколиственных деревьев вяза, липы, дуба, орешника (*Corylus*). Неоднократные изменения в составе основных компонентов леса в этот период отражают нестабильную экологическую обстановку с быстро меняющимися условиями. Для этого времени известны поселения раннего бронзового века.

Начиная с 2.4 до 0.8 тыс. кал. л. н. (400 кал. л. до н.э.–1200 н. э.), преобладают сосновые леса с примесью ели, пихты и березы, включая широколиственные деревья. Климатические условия в начале периода были близки к современным, но около 1.7 тыс. кал. л. н./300 л. н. э., началось похолодание и уменьшение влажности. Для этого времени известны археологические памятники железного века.

Заключение. В результате комплексного палеоэкологического исследования VI Разреза-2020 на Горбуновском торфянике получена последовательность палинологических данных за весь голоцен и часть позднеледниковья; большое количество AMS-дат уточняет время климатических флуктуаций. Эти данные сопоставлены с археологическими реконструкциями освоения Горбуновского озера – торфяника, начиная с ран-

него мезолита и по железный век. Объединение палеоэкологических, археологических методов и радиоуглеродного датирования позволило лучше понять взаимосвязь природных условий и характер хозяйственной деятельности древнего населения в разные периоды.

Финансовая поддержка исследования была оказана отделом Евразии Немецкого археологического института (DAI), по специальной программе DAI «GroundCheck – Заселение леса: процессы расселения в лесной зоне Уральского региона и их климато-экологические регулятивные факторы» и Института истории и археологии УрО РАН.

1. Антипина Т.Г., Панова Н.К., Чаиркина Н.М. Динамика природной среды в голоцене по данному комплексному анализу В.И. Разреза Горбуновского торфяника. Известия Коми научного центра УрО РАН (Сыктывкар). – 2013. – 16 (4). С. 89–97.
2. Жилин М. Г. и др. Мезолитические памятники Горбуновского торфяника. – М.; СПб.: Нестор-История, – 2020. – 368 с.
3. Зарецкая Н.Е., Панова Н.К., Жилин М.Г., Антипина Т.Г., Успенская О.Н., Савченко С.Н. Геохронология, стратиграфия и история развития торфяных болот Среднего Урала в голоцене (на примере Шигирского и Горбуновского торфяников) // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2014. – том 22, № 6. – С. 84–108.
4. Панова Н. К., Антипина Т.Г. История развития Горбуновского торфяника на Среднем Урале и освоение его территории человеком в голоцене // Динамика современных экосистем в голоцене (12–15 марта 2013 г.): матер. Третьей Всерос. науч. конф. (с международным участием). Казань. – 2013. – С. 273–276.
5. Хотинский, Н. А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука. – 1977. – 199 с.
6. Чаиркина, Н. М. Энеолит Среднего Зауралья. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 312 с.
7. Чаиркина, Н. М. Археологические исследования Стоянки VI Разрез Горбуновского торфяника в 2007 году / Н. М. Чаиркина // Древности Горбуновского торфяника. Охранные археологические исследования на Среднем Урале: сб. науч. статей. Вып. 6. Екатеринбург: Банк культ. инф-и. – 2010. – С. 134–156.
8. Chairkina, N.M., Kuzmin, Y.V., Hodgins, G.W.L., 2017. Radiocarbon Chronology of the Mesolithic, Neolithic, Aeneolithic, and Bronze Age Sites in the Trans-Urals (Russia): A General Framework. Radiocarbon 59 (2), 505–518.
9. Davis B. A. S. et al. (Antipina, Galimov, Panova). The Eurasian Modern Pollen Database (EMPD), Version 2 //Earth system science data. – 2020. – Т. 12. – №. 4. – С. 2423–2445.
10. Haslett, J., & Parnell, A.C. (2008). A simple monotone process with application to radiocarbon-dated depth chronologies. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), – 57(4), 399–418.
11. Panova N. K., Antipina T. G. Late Glacial and Holocene environmental history on the eastern slope of the Middle Ural Mountains, Russia // Quaternary International. – 2016. –V. 420. – P. 76–89.
12. Reimer et al. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). Radiocarbon. – 2020. – 62 (4). – P.725–757.

СРАВНЕНИЕ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БОТАНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОРФА

MIDDLE PRIOBYE KEY SITES PALEOCLIMATIC FEATURES COMPARISON BASED ON THE PEAT MACROFOSSIL PROXY

В. Р. Батршина
V. R. Batrshina

Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)
e-mail: lera.batrshina@icloud.com

В раннем голоцене (11,5 тыс. лет назад) на территории Западной Сибири, под влиянием климатических изменений, вызванных послеледниковым потеплением, начали формироваться торфяники. Скорость образования торфа обусловлена объемом отмирающей биомассы, влияющей на перемещение углерода из верхнего слоя (поверхностной части) в нижний. Этот процесс напрямую зависит от климатических факторов и состава произрастающих растений, из которых формируется торф. Таким образом, накопление торфа происходит неравномерно во времени и определяется соотношением между притоком органического вещества и его разложением. (Zarov et al).

Анализ болотных экосистем позволяет не только реконструировать климатические изменения в прошлом, но и прогнозировать реакции торфяников на будущие климатические изменения (Tsyganov et al; Ratcliffe et al; Xu J. et al). Существует несколько принципиально разных подходов к исследованию палеоклимат: математическое моделирование, использование палинологических, дендрохронологических, гляциологических и других методов (Слепцов и др.).

Использование ботанического состава торфа в качестве палеоклиматического индикатора было представлено в работах (Halaš A. et al; Marcisz K. et al). Эти исследования направлены на изучение климатических характеристик торфяных залежей по остаткам растений, сохранившихся в торфе.

В работе (Tsyganov et al) применен более широкий спектр палеоэкологических характеристик: ботанический состав растений, раковинные амебы, N-алканы, гумификация торфа и другие. Важно отметить, что комплексный анализ различных палеоэкологических показателей позволяет получить более точную и полную картину климатических изменений в прошлом.

В исследованиях палеоклимата помимо традиционных методов могут быть применены характеристики увлажнения по шкале Раменского (УВ) и богатства-засоленности (БЗ). Однако их использование в изучении болот ограничено, так как при разложении растительных остатков в торфе сохраняются преимущественно растения-торфообразователи, не отражая в полной мере состав растительного сообщества в прошлом. В настоящее время нами апробируется методика, позволяющая использовать шкалы Раменского для реконструкции прошлых изменений в болотных экосистемах.

Исследование ботанического состава торфа позволяет реконструировать картину изменений растительности территории в прошлом. Анализ палеоэкологических показателей, таких как УВ и БЗ, поможет оценить климатические изменения в прошлом и предположить возможные будущие изменения.

Целью данного исследования является применение шкал и сравнение палеоклиматических характеристик торфяной залежи территорий болотных массивов международного стационара Мухрино, природного парка «Кондинские озера» и территории озера Пунси (Большое Каюково).

Исследование проводилось на трех участках: Мухрино: полевая станция на левобережной долине р. Иртыш, в 30 км к югу от Ханты-Мансийска (60°53.2' с.ш., 68°42.1' в.д.); природный парк им. Сташкевича «Кондинские озера» в 430 км к западу от Ханты-Мансийска (60°53.8' с.ш., 63°35.6' в.д.); озеро Пунси в Сургутском районе, в 360 км к юго-востоку от Ханты-Мансийска (60°11.0' с.ш., 72°47.1' в.д.).

Для исследования были отобраны несколько торфяных колонок (Мухрино - глубина 5 м, Кондинские озера - глубина 3.4 м в, озеро Пунси - глубина 2.8 м) до минерального ложа.

В лаборатории образцы делились на 10-сантиметровые сегменты, для каждого из которых проводился ботанический анализ. Для ботанического анализа 10-сантиметровый образец промывался через сито (0.25 мм). Макростатки рассматривались под микроскопом (Zeiss Axiostar, Германия) при увеличении 10–40х. Для построения стратиграфической колонки использовалась программа Peat Graph 1.1 (Дюкарев и др.). Для расчёта УВ и БЗ торфа использовались экологические показатели растений по шкале Рамменского в пакете IBIS 7.2. (Зверев и др.).

Ботанический состав стратиграфической колонки (рис. 1А) изменяется с глубиной: 0–360 см - преобладание *Sph. fuscum* с примесью пушицы, кустарничков, коры и древесины сосны и небольшой примесью (130–140 см) *Sph. angustifolium*. На глубине 140 см обнаруживается прослойка с обилием вересковых кустарничков и коры, и древесины сосны. С глубины 400–500 происходит преобладание хвоща с примесью *C. lasiocarpa*, *Sph. angustifolium* и *Sph. subsecundum*. По всей колонке преобладает сфагновый торф.

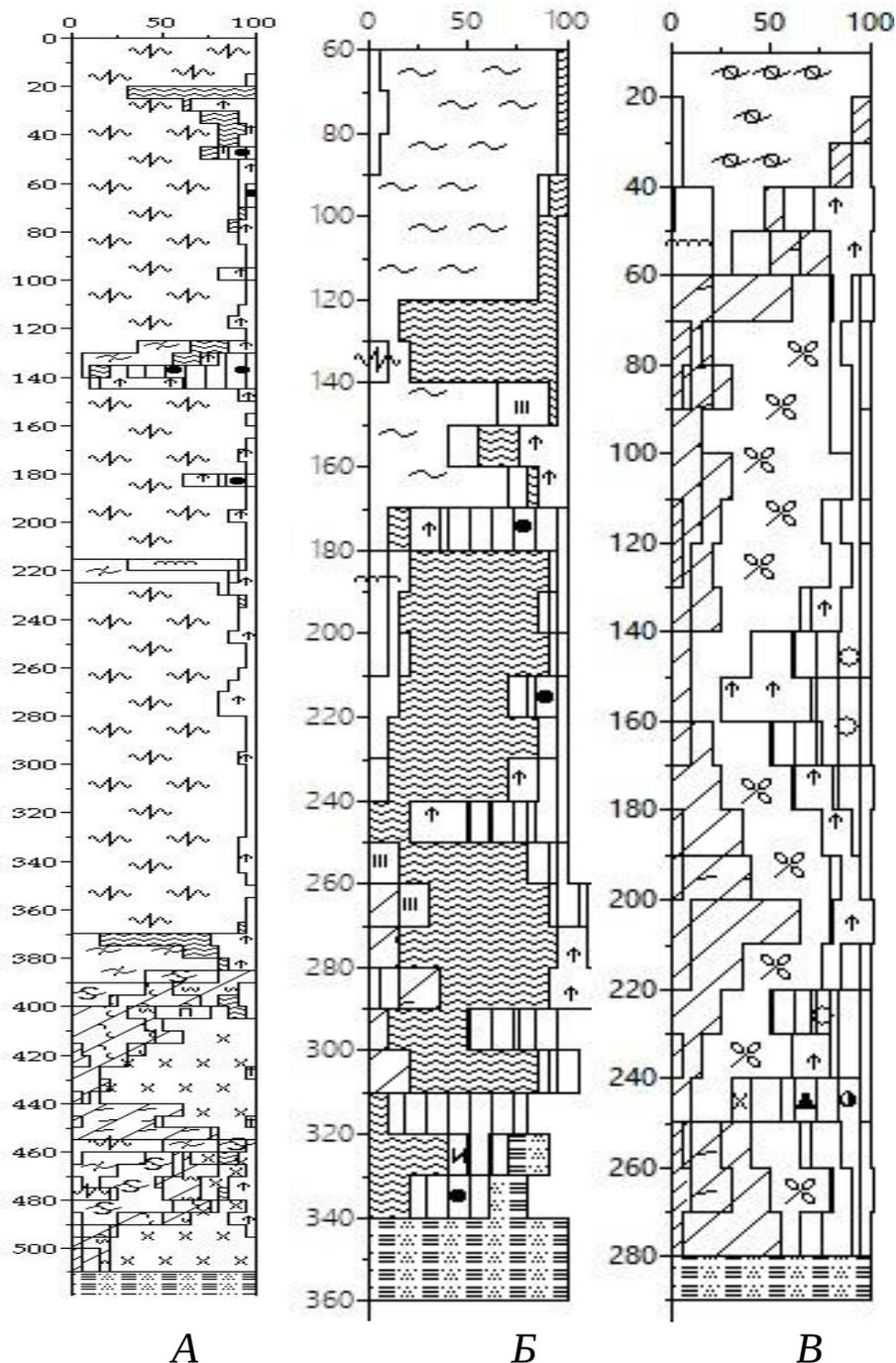


Рисунок 1. Стратиграфические колонки по ключевым участкам: (А) Мухрино, (Б) Кондинские оз., (В) оз. Пунси

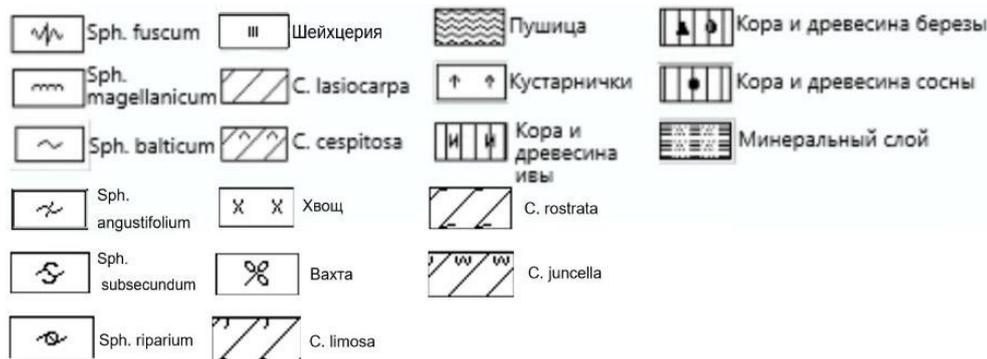


Рисунок 2. Легенда

Состав стратиграфической колонки (рис. 1Б) изменяется с глубины 60-170 преобладает Sph. balticum с примесью Sph. fuscum на глубине 140 см, так же наблюдается пик нарастания пушицы. С глубины 160 см наблюдаются вересковые кустарнички, а с глубины 180 см преобладает пушицево-древесный торф с примесью Sph. magellanicum. С глубины 260 появляется вахта и кора, и древесина ивы. Пушицево-древесный торф сохраняется до придонного слоя.

Вдоль стратиграфического профиля зафиксировано следующее (рис. 1В): на глубине 20-40 см Sph. riparium. С глубины 40 см появляются вересковые кустарнички с примесью Sph. magellanicum. С 60 до 140 см идет вахтово-пушицевый торф, ниже 140 см прирост коры и древесины березы. С 200 см преобладает C. rostrata с вахтой и древесными остатками. С 240 см появляется хвоц. До минерального ложа преобладает древесно-травяной тип торфа.

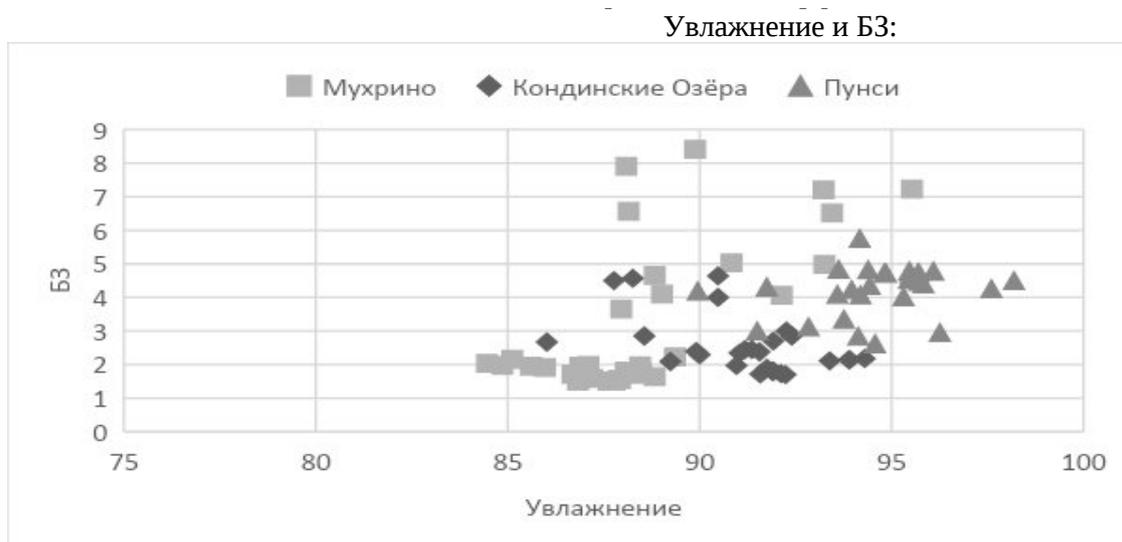


Рисунок 3. Результаты по показателям увлажнение (УВ) и богатство засолённость (БЗ) по трём ключевым участкам

На рисунке 3, для торфа с Мухрино наблюдаются низкие значения УВ (84.46 ступеней (ст)), минимум значения БЗ в среднем составляет 1,6 ст. что свидетельствует тому, что болото развивалось в основном в олиготрофной стадии, но, к придонному слою наблюдаются более высокие показатели БЗ (8.41 ст.), что указывает на наличие более влажных мезо- и эвтрофных торфов. Несмотря на это, некоторые точки имеют показатель 1.5 ст., из чего следует, что в какой-то период развития было более влажное и мезотрофное (или даже эвтрофное) питание; территория парка

развивалась более однородно, имея минимум УВ только в придонном слое, максимальное значение – 94.3 ст., значения БЗ в среднем составляет 2.56 ст., достигая максимумов только в придонном слое; оз. Пунси тоже олиготрофное, так же, как и Мухрино, но более влажное, имея максимум в 98.19 ст., что выше, чем на двух других участках. Показатель БЗ имеет максимум в 5.75 ст. в середине колонки.

Между участками Мухрино и Пунси обнаруживается схожесть в процессах развития торфяной залежи сопоставление, выраженное в высо-

ких значениях БЗ; территория парка Кондинские озера более однородна по обоим показателям.

В ботаническом составе торфа на территории Мухрино преобладают сфагновые мхи, что указывает на значительное наличие верховых

торфов; на территории парка Кондинские озера и озера Пунси преобладает древесно-травяной торф, что свидетельствует о выраженных этапах развития низинного и переходного типа (наличие также в придонных слоях гипновых мхов).

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Тюменской области в соответствии с программой Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня в рамках национального проекта «Наука». Соглашение № 94-ДОН/05.5/20-ЮГУ-231 от 14.12.2020.

1. Дюкарев Е.А. Программа для анализа распределения растительных остатков и типов торфа по глубине // Материалы Пятого Сибирского совещания по климатно-экологическому мониторингу. Томск: Изд-во ТНЦ СО РАН, 2003, с.171.
2. Зверев А. А. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова. – 2007.
3. Слепцов А. М., Клименко В. В. Обобщение палеоклиматических данных и реконструкция климата Восточной Европы за последние 2000 лет //История и современность. – 2005. – №. 1. – С. 118-135.
4. Halaš A. et al. Developing a new testate amoeba hydrological transfer function for permafrost peatlands of NW Siberia //Quaternary Science Reviews. – 2023. – Т. 308. – С. 108067.
5. Marcisz K. et al. Testate amoeba functional traits and their use in paleoecology //Frontiers in Ecology and Evolution. – 2020. – Т. 8. – С. 575966.
6. Ratcliffe, J.L., A. Creevy, R. Andersen, E. Zarov, P.P.J. Gaffney, M.A. Taggart, Y.A. Mazei, A.N. Tsyganov, et al. 2017. Ecological and environmental transition across the forested-toopen bog ecotone in a west Siberian peatland. Science of the Total Environment 607–608: 816–828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.276>.
7. Tsyganov A. N. et al. Key periods of peatland development and environmental changes in the middle taiga zone of Western Siberia during the Holocene //Ambio. – 2021. – Т. 50. – С. 1896-1909.
8. Xu J., Morris P.J., Liu J., Holden J. 2018. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. Catena, 160: 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.010>
9. Zarov E. A. et al. Carbon Accumulation and the Possibility of Carbon Losses by Vertical Movement of Dissolved Organic Carbon in Western Siberian Peatlands //Forests. – 2023. – Т. 14. – №. 12. – С. 2393.

К ИСТОРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ОХРАНЯЕМОГО ФОНДА БОЛОТ В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

TO THE HISTORY OF THE ALLOCATION OF THE PROTECTED FUND OF BOGS IN THE TOMSK REGION

Д.М. Витусик, Е.Н. Крицкая, Е.В. Порохина
D.M. Vitusik, E.N. Kritskaya, E.V. Porokhina

Томский государственный педагогический университет (г. Томск, Россия)
E-mail: porohkatrin@yandex.ru

Болота выполняют ряд функций: гидрологическую, геоморфологическую, климатологическую и др. (Болота Западной Сибири, 2000). В настоящее время болотные экосистемы испытывают большое антропогенное воздействие. Обширные площади болот приурочены к регионам, где ведется интенсивная добыча нефти. Объекты нефтедобывающей промышленности являются основными источниками поступления загрязняющих веществ в болота: нефти, нефтепродуктов и сопутствующих веществ (тяжелые металлы, соли), несмотря на существующие требования в области охраны окружающей среды. Как следствие – хозяйственная деятельность производственных объектов нефтедобывающего комплекса способна нанести ущерб болотным экосистемам, что проявляется в изменении условий существования болот, изменение трофности болот, нарушении ландшафтных взаимосвязей на территории в целом, возникновению несвойственных экосистем.

Поэтому, актуальными вопросами являются охрана болот, оценка антропогенного воздействия на почвы болот, научно-обоснованное регулирование хозяйственной деятельности на заболоченных территориях. И, следовательно, рациональное использование торфяных ресурсов означает принятие мер по сохранению отдельных болот полностью или их части.

Цель исследований: дать характеристику торфяных месторождений Томской области, рассмотреть и проанализировать критерии выделения торфяных болот в охраняемый фонд, используемые в разных областях Российской Федерации, а также обратиться к истории решения этого вопроса в Томской области.

Томская область располагается на Западно-Сибирской низменности, занимая ее центральную часть, характеризуется высокой заболоченностью (50%) и заторфованностью (35,6%). По типам болотных биогеоценозов, строению

и мощности стратиграфического профиля Томская область является представительной для Сибирского и Уральского федеральных округов. По запасам торфа Томская область занимает 2-е место в РФ после Тюменской. На ее территории выявлено и учтено 1505 торфяных месторождений общей площадью в границах промышленной залежи 7,7 млн. га с запасами торфа 29,3 млрд. т в расчете на 40%-ю влажность, что составляет 18,1% от запасов РФ. Большое распространение на территории Томской области имеют месторождения площадью более 50 тыс. га, запасы торфа в которых составляют 67,8% от общих запасов области. Около 16,7% запасов торфа сосредоточено на 65 месторождениях, имеющих площади от 10 до 50 тыс. га. Наибольшее количество месторождений (649) имеют площадь от 101 до 1000 га, которые по запасам торфа не превышают 4,5% всех запасов торфа области. Большая часть представлена торфом верхового типа (57%); доля переходного и низинного типов составляют 39,5%. Смешанная залежь (4,0%) представлена в виде отдельных участков на крупных массивах с торфом верхового типа (Концепция охраны и рационального..., 2005).

Ранее для детально изученных торфяных ресурсов Республики Беларусь был разработан научный подход к выбору направлений использования торфяных болот в народном хозяйстве (Тановицкий, 1980). Было предложено подразделять ресурсы торфа на пять целевых фондов: земельный, запасной, резервный, разрабатываемый и охраняемый (Рис.).

Эколого-хозяйственный фонд (ЭХФ) торфяных болот представляет собой совокупность торфяных болот и их участков как особой природно-территориальной единицы, выполняющей определенные экологические, хозяйственные или эколого-хозяйственные функции и используемой на данный период (существующий ЭХФ) или планируемой к использованию (прогнозный ЭХФ).



Рисунок. Распределение торфяных ресурсов по эколого-хозяйственным фондам
(Торфяные ресурсы Томской ..., 1995)

Формирование ЭХФ производится в пределах водосборных бассейнов. Определение существующего ЭХФ производится по данным разведки, проектам земельного и лесного фондов и другим материалам. После выявления существующего ЭХФ проводится формирование прогнозного. Для этого неиспользуемый торфяной фонд с учетом критериев выделения ЭХФ вновь распределяется по направлениям наиболее рационального их использования. Такое разделение по фондам осуществили также Ленинградская, Тверская и Новосибирская области. Сделали это и в Томской области (Торфяные ресурсы Томской..., 1995). Практически во всех областях Российской Федерации, в которых болота были выделены в охраняемый фонд, пользовались критериями, разработанными учеными Республики Беларусь.

1. Для сохранения объектов водоохранного значения выделяются болота:

а) расположенные на водоразделе и являющиеся источниками питания мелких рек и крупных озер;

б) верхового типа или их части с водоохранной зоной для внутриболотной гидрографической сети (речки, ручьи, протоки, топи, озера) в соответствии с требованиями Положения о ВОЗ для рек и озер (постановление Правительства от 23.11.96, № 1404);

в) напорного питания по берегам озер, служащие для подземного питания озер;

г) при наличии родников, используемых в курортологии, или как источники питьевой воды;

д) площадью от 1 до 10 га на сельскохозяйственных угодьях или от 1 до 30 га в лесах, если они являются регуляторами водного режима и источниками водного питания фауны;

е) если подстилающий грунт торфяного месторождения и грунт прилегающих территорий сложен из песков, имеет резко выраженное

напорное питание и при осушении невозможно обеспечить необходимый уровень грунтовых вод.

2. Для защиты пойм рек от почвенной эрозии сохраняются представительные болота пойменного залегания и болота, защищающие сельскохозяйственные угодья от эрозии.

3. Для сохранения дикорастущих ягод и лекарственных трав (выявляются исследованиями).

4. Для сохранения редких и исчезающих экземпляров фауны и флоры (определяются на основании исследований).

5. Для научных целей сохраняются уникальные в генетическом, геохимическом, археологическом планах торфяные болота, на которых ведутся научные исследования (по заключению ученых).

6. В рекреационных и санитарно-гигиенических целях охраняются торфяные болота, расположенные у городов с численностью населения от 20 до 100 тыс. человек в зоне 5-10 км; у городов с численностью свыше 100 тыс. человек в зоне 10-25 км. При наличии в городе предприятий химической промышленности защитная зона увеличивается еще на 25%.

7. Для охотничьих и рыболовных целей в охраняемый фонд распределяются торфяные болота, их участки и заболоченные территории, играющие важную роль в воспроизводстве ценных представителей охотничьей фауны (по предложению комитета по охране природы, Администрации, общества охотников и рыболовов).

8. В охраняемый фонд включаются торфяные болота и заболоченные территории, используемые перелетными птицами для отдыха и питания во время перелетов (по заключению ученых).

9. В охраняемый фонд включаются болота, используемые в бальнеологии и для археологических раскопок.

10. В охраняемый фонд включаются торфяные болота, находящиеся на территории особо охраняемых природных территорий.

11. В охраняемый фонд включаются болота и заболоченные территории, соответствующие критериям международной значимости, представляющие собой уникальные для данной территории водно-болотные угодья (по заключению ученых)

Приведенные критерии для выделения охраняемого фонда торфяных болот необходимо рассматривать как предварительные. При анализе критериев охраняемого фонда можно заметить, что часть их (например, пункты 4, 5, 7, 8), не связанные с природно-климатическими особенностями регионов, регламентируются соответствующими нормативными документами, имеют определенный режим охраны и могут применяться на любой территории. В то время как другая группа критериев (пункты 1, 3) в условиях высокой заболоченности территории и преобладания крупных торфяно-болотных систем требует основательных научных исследований. Так, если охраняемый фонд выделять по наличию на болоте озер, как это рекомендуется белорусскими учеными, то все крупные болотные системы окажутся полностью охраняемыми. Следовательно, для условий территорий, характеризующихся преобладанием крупных болотных систем с высокой степенью озерности и уникальной болотной гидрографической сетью, необходимо разработать

другие критерии выделения охраняемого фонда (Тановицкий, 1980).

В Томской области к вопросу выделения охраняемого фонда торфяных болот приступили в 1988 году, когда Сибирскому НИИ торфа было поручено составить перечень торфяных месторождений для включения в охраняемый фонд. В работе приняли активное участие Ю.А. Львов, к.б.н., зав. лаб. биогеоценологии НИИ биологии и биофизики при ТГУ, С.И. Смольянинов, профессор, д.т.н., зав. кафедрой химической технологии топлива ТПИ и их коллективы.

Результаты работы были доложены на заседании областного производственного объединения по агрохимическому обслуживанию «Томскоблагропромхимия» (председатель В.Д. Лариков). Был подготовлен протокол проекта по включению торфяных месторождений в природоохранный фонд на имя председателя Томского облисполкома О.Э. Кушелевского. Но этим протоколом не пришлось воспользоваться, так как на заседании «Томскоблагропромхимия» было принято решение, что предоставленные материалы недостаточно обоснованы.

Прошло 25 лет. Создание критериев выделения ЭХФ позволило бы грамотно разделить торфяные месторождения по направлениям использования. Без этих критериев приступить к оптимизации рационального природопользования на торфяных болотах России и Томской области, в том числе, не представляется возможным.

1. Болота Западной Сибири - их роль в биосфере. 2-е изд. / под ред. А.А. Земцова. – Томск: ТГУ, СибНИИТ, 2000. – 72 с.
2. Концепция охраны и рационального использования торфяных болот России / А.Е. Афанасьев, Л.И. Инишева, Н.Г. Ковалев [и др.]; под общ. ред. Л.И. Инишевой. – Томск: ЦНТИ, 2005. – 99 с.
3. Тановицкий И.Г. Рациональное использование торфяных месторождений и охрана окружающей среды. – Минск: Наука и техника, 1980 – 40 с.
4. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов Л.С. Миханьева. – Новосибирск: СО РАСХН, 1995 – 88с.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ БОЛОТ В ПРЕДЕЛАХ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО САЯНА

HOLOCENE DEVELOPMENT OF MIRES IN THE EASTERN SAYAN FOOTHILLS

А.В. Гренадерова

A.V. Grenaderova

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск, Россия)

E-mail: grenaderova-anna@mail.ru

В рамках настоящего исследования, с помощью комплексного палеоэкологического анализа, изучены торфяные отложения в бассейне р. Мина (правобережье р. Енисей) с водосбором на северо-западном макросклоне Восточного Саяна. Полученная реконструкция сопоставлена с палеоархивами (болото Большое, болото Пинчинское), расположенными ниже по склону, что позволило описать характер изменения природных условий в голоцене для западной части Восточного Саяна.

Объектом исследования являются отложения пойменного болота (560 м над уровнем моря), расположенного в приустьевом участке р. Мина между склонами Кутурчинского и Койского белогорья, в пределах Алтае-Саянской горной лесорастительной области, Восточно-Саянской лесорастительной провинции (Коротков, 1994), в Горно-Саянском торфяно-болотном округе (Платонов, 1964).

Общая мощность колонки – 2,40 м, из них торф – 2,05 м, оторфованный суглинок – 0,35 м. Образцы изучены с помощью палеоантракологического (Clark, 1988), ботанического и спорово-пыльцевого анализа. Радиоуглеродный возраст отложений в интервале 2,35-2,30 м составил 7135 ± 35 лет (Poz-119029), 1,40-1,35 м – 1190 \pm 30 лет (Poz-119028).

По результатам ботанического анализа, установлено, что суглинок, подстилающий торфяную залежь (соответствует возрасту 7900-5700 кал. л. н.) включает макрофоссилии смешанного темнохвойного леса (*Picea obovata* и *Pinus sibirica*). Торфяная толща имеет двуслойное сложение, нижняя часть (2,05-1,30 м, 5700-1000 кал. л. н.) образована древесно-сфагновым низинным торфом, верхняя (1,30-0,05 м, от 1000 кал. л. н. до 60 кал. л. н.) – сфагновым переходным торфом (*Sphagnum angustifolium*, *Sph. cuspidatum*, *Sph. fuscum*, *Sph. rubellum*).

Согласно данным спорово-пыльцевого анализа в раннеатлантическое время на склонах Кутурчинского и Койского белогорья были развиты темнохвойные пихтово-елово-кедровые леса, часто случались пожары (слой органоминеральных

отложений сформированный в интервале 7000-6100 кал. л. н. характеризуется высоким содержанием древесного угля – до 114 частиц/1 см³). Начало торфонакопления в пойме р. Мина приходится на 5700-5500 кал. л. н. Снижение обводненности пойм и начало торфонакопления, увеличение пожарных сигналов – может быть откликом на термический оптимум голоцена (Хотинский, 1977), когда температуры превышали современные на 2-6 °С летом, зима на 3-9 °С теплее (Кошкарлова, Кошкарлов, 2003).

Период 5200-4000 кал. л. н. отличался увеличением общей увлажненности, по склонам произрастали пихтово-елово-кедровые разнотравно-папоротниковые леса, интервал 4300-3800 кал. л. н. характеризовался значительным распространением пожаров. Позже, с 3800-2500 кал. л. н. на болоте на смену елово-сфагновому сообществу пришел ерник зеленомошно-сфагновый, периодически случались пожары.

Начиная примерно с 1200 кал. л. н. в составе локального болотного сообщества господствует сфагновый мох, доминирует *Sph. angustifolium*, болото переходит на мезотрофно-олиготрофную стадию развития. В составе пыльцевых спектров (древесные+травянистые) отмечается увеличение содержания кедра до 52%, доля пихты и ели соответственно 12 и 14%, что отражает развитие пихтово-елово-кедровых лесов в условиях стабильного увлажнения вплоть до 900-800 л.н. Благодаря относительно высокой скорости торфонакопления, имевшей место последние 1200 кал. л., удалось описать временные интервалы, отличающиеся трансформацией растительного покрова. Так, резкое изменение фиксируется 700-600 кал. л. н., в составе спорово-пыльцевого спектра концентрация пыльцы крайне низкая, участие пыльцы хвойных растений минимальное, основу спектра составляют *Betula sect. Nanae* (свыше 65%), пыльца Ericaceae, и споры *Sphagnum*, низкая пыльцевая продуктивность древесных отмечена и около 450-400 кал. л. н., что может отражать активизацию стадий малого ледникового периода.

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

1. Коротков И. А. (1994) Лесорастительное районирование России и республик бывшего СССР // Углерод в экосистемах лесов и болот России / Под ред. В. А. Алексеева и Р. А. Бердси. – Красноярск: ВЦ СО РАН. С. 29–47.
2. Кошкарлов А. Д., Кошкарлова В. Л. (2003) Развитие природной среды реки Кас в послеледниковый период // Палеогеография Средней Сибири: сб. ст. / Красноярск. гос ун-т. Красноярск. С. 37-43.
3. Платонов Г. М. (1964) Болота лесостепи Средней Сибири : [монография] / Г. М. Платонов. – Москва : Наука. 116 с.
4. Хотинский Н.А. (1977) Голоцен Северной Евразии: Опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. М.: Наука. 197 с.
5. Clark, J. S. (1988) Particle motion and the theory of stratigraphic charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling / S. J. Clark // Quaternary research. – V.30. – PP. 67–80.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОПОЖАРОВ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРНОГО УРАЛА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 5000 ЛЕТ ПО ДАННЫМ ПАЛЕОАНТРАКОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРЕЗА ХОРПИЯ

RECONSTRUCTION OF PALEOFIRES IN THE TAIGA ZONE OF THE NORTHERN URALS OVER THE PAST 5000 YEARS ACCORDING TO PALEOANTHRACOLOGICAL ANALYSIS OF THE KHORPIYA SECTION

А.А. Зорина¹

A.A. Zorina¹

¹ ФГБУН Ботанический сад УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

E-mail: alesya.zorina44@gmail.com

Физико-географические изменения в прошлом являются основой для выяснения алгоритмов и построения прогностических моделей изменения современных экологических систем. Поняв, как биомы, сформировавшиеся в начале голоцена, реагировали на климатические изменения, которые начались тогда, мы сможем спрогнозировать изменения нашего леса в современности. Решению обозначенных выше проблем служит палеоэкология. Под палеоэкологией понимают науку, направленную на выявление особенностей окружающей среды прошлого (Пестрякова, 2016). Одним из таких направлений является палеоантракологический анализ.

Пожар является важнейшим фактором нарушения природных условий в лесах умеренного пояса, определяет структуру и историю развития растительного покрова (Whitlock, 2003). Анализ лесных пожаров прошлого позволяет описать региональные сценарии ответа биоты на антропогенные и природные факторы (Куприянов, 2019).

Частота возникновения лесных пожаров зависит от различных факторов, включая климатические условия, рельеф и структуру леса, а также воздействие человеческой деятельности. В настоящее время имеется большое количество научных трудов, посвященных исследованиям периодичности лесных пожаров в России в прошлом, в том числе и на западном склоне Северного Урала (Алейников, 2015). Они основаны на анализе обширных архивных материалов, дендрохронологических исследований и концентрации частиц угля в торфе. Информации о пожарах на Урале относительно мало, что подчеркивает актуальность данного исследования.

Цель исследования заключалась в анализе динамики возникновения пожаров в таежной зоне Северного Урала в голоцене на примере торфяника Хорпия 1. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: изучить содержание макроскопических частиц угля на всей глубине торфяного слоя, выявить прошедшие пожары на исследуемых территориях и сопоставить их с динамикой растительности.

Объект и методы исследования. Исследуемый торфяник – береговое торфяное обнажение на левобережье р. Лозьва в Ивдельском районе Свердловской области (61°02' с. ш.; 60°03' в. д.; 120 м над ур. м.). Исследуемый торфяник расположен вблизи южной границы подзоны северной тайги. Болото переходного типа. Растительный покров окружающей его территории представлен березово-сосновым зеленомошно-ягодным лесом (Антипина, 2014).

Подсчет макроскопических частиц угля в торфе осуществлялся по стандартной методике (Mooney, 2011). Статистическая обработка полученных данных концентрации макроскопических частиц угля в торфе осуществлялась в программе CharAnalysis, адаптированной для среды программирования R (Higuera, 2009).

Сопоставление пожаров проводилось на основе спорово-пыльцевого анализа, проведенного Антипиной Т. Г. (Антипина, 2014).

Результаты и обсуждение. График скорости аккумуляции макроскопических частиц угля и распределения локальных пирогенных событий (рис.) показывает 13 пожаров на локальном уровне.

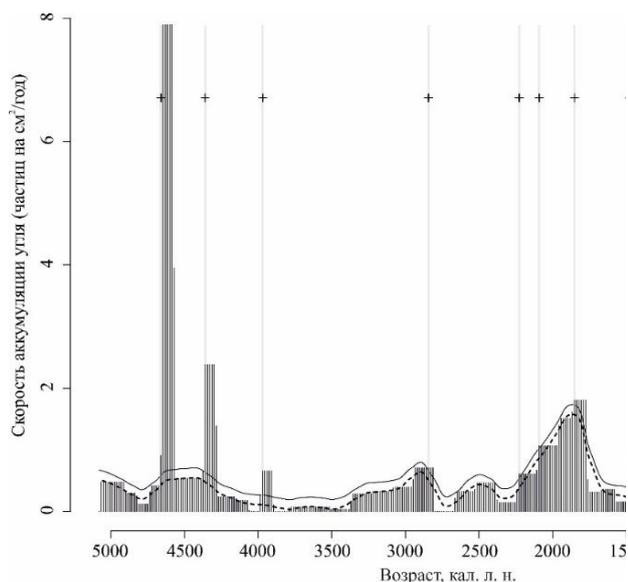


Рисунок. Скорость аккумуляции древесного угля разреза Хорпия 1

Период ~5000–4000 кал. л. н. выделяет 2 пика, один из которых является максимальным во всем разрезе со скоростью аккумуляции 8 угольных частиц на см²/год. В данный период отмечается снижение доли ели и сосны в растительном сообществе, в то время как доля березы увеличивается, а значимость травянистых растений растет.

Временной интервал примерно от 4000 до 2800 кал. л. н. характеризуется минимальными скоростями накопления угольных частиц (меньше 1 см²/год). Для данного интервала выделено также 2 пожара на локальном уровне со слабовыраженными пиками. Пыльцевой комплекс характеризует растительность – елово-сосновые леса с примесью березы.

В период от 2800 до 1700 кал. л. н. выделяются 3 локальных пожара со скоростью накопления до 2 частиц в см²/год. По данным палинологического анализа также доминируют сосны, которые после пожарных пиков сменяют ели.

В последние 1700 кал. л. н. наблюдаются 6 пиков, наибольший из которых имеет скорость накопления угольных частиц чуть больше 2 см²/год. В результате данного локального пожара растительность была заменена сосновыми лесами, причем ель в это время достигла минимальной концентрации за весь период.

Выводы. Лесные пожары имели существенное воздействие на развитие растительного покрова за последние 5000 лет. Сравнение данных палинологического и палеоантракологического анализов указывает на взаимосвязь между изменениями в структуре растительного покрова и частотой возникновения пожаров на исследуемой территории.

1. Алейников А. А., Тюрин А. В., Симакин Л. В., Ефименко А. С., Лазников А. А. История пожаров в темнохвойных лесах Печоро-Илычского заповедника со второй половины XIX века по настоящее время. Сиб. лесной журн. 2015. № 6. С. 31–42.
2. Антипина Т. Г., Панова Н. К., Корона О. М. Динамика растительности и природных условий на восточном склоне Северного Урала в голоцене. Экология. 2014. № 5. С. 353–361.
3. Куприянов Д. А., Новенко Е. Ю. Реконструкция динамики лесных пожаров Центральной Мещеры в голоцене (по данным палеоантракологического анализа). Сибирский экологический журнал. 2019. Т. 26. № 3. С. 253–263.
4. Пестрякова Л. А., Николаев А. Н., Субетто Д. А., Фролова Л. А., Бобров А. А., Городничев Р. М. 2016. Палеоэкология. Методологические основы палеоэкологии: Учебно-методическое пособие. Министерство образования и науки РФ, Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова. Якутск. С. 84.
5. Higuera P. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Bozeman: MT, Montana State University. 2009. P. 27.
6. Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. Mires and Peat. 2011. Vol. 7. P. 1–18.
7. Whitlock C., Bartlein P. J. Holocene fire activity as a record of past environmental change. Developments in Quaternary Sci. 2003. Vol. 1. P. 479–490.

ТОРФЯНЫЕ ПАЛЕОПОЧВЫ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ

THE HISTOSOLS PALEOSOLS IN STRATIGRAPHIC SECTIONS OF THE MIDDLE OB RIVER VALLEY

Е.А. Коркина¹, С.Е. Коркин^{1,2}
E.A. Korkina, S.E. Korkin

¹ Нижневартковский государственный университет (г. Нижневартовск, Россия)

² Российская академия наук Институт экологии растений и животных (г. Екатеринбург, Россия)
e-mail: egf_nv@mail.ru

Исследованные палеопочвы, в стратиграфических разрезах долины реки Обь показывают формирование торфяных, глеевых горизонтов в эпоху плейстоцена. Органический материал в палеопочвенных горизонтах, в основном состоит из злаковой и осоковой травянистой растительности. Накопление органики происходило на мерзлых суглинистых, либо супесчаных породах. Слабопромывной тип непроточных водоемов способствовал накоплению сфагнома и формированию торфяников. В отличие от современных торфов, плейстоценовые торфяно-глеевые почвы более минерализованы. В стратиграфических разрезах погребенные торфяники отличаются от сформированных почв с поверхности.

Ключевые слова: долина реки Обь, позднеплейстоценовый период, палеопочвы, торфо-накопление, органическое вещество.

Данное исследование констатирует некоторые результаты по изучению палеокриогенеза в перегляциальной зоне Западно-Сибирской равнины и формированию торфяных горизонтов палеопочв, с высокой долей органического вещества. В пределах среднего течения Обской долины, можно классифицировать на два типа: 1) осадочные толщи со следами криометаморфических деформаций 2) осадочные толщи с включением валунно-галечникового материала. Территория исследования относится к зоне островной мерзлоты и перелетков Арктического региона и располагается в пределах 60 – 62 параллели северной широты. Возникновение палеокриогенных деформаций их генезис и условия осадконакопления в разрезах среднего течения Оби является дискуссионным вопросом. Накопление и формирование осадочных толщ происходило в неоплейстоценовое время. Смена осадконакопления подчиняется межстадиальным и интерстадиальным периодам. Проявление интенсивного палеокриогенеза приходится на период верхнего плейстоцена.

Исследуемые разрезы, долины р. Обь, вмещают в себя разнотипные жильные структуры, различающиеся по размерам, строению. Общей тенденцией для исследуемых разрезов является нижний ярус, представленный песчаными породами с прослойками гидроокислов железа.

Обобщающая тенденция разрезов выглядит следующим образом:

Первый ярус на глубинах 12 – 14 м представлен песком с прослойками гидроокислов железа.

Второй ярус (на глубине 10 – 12 м) стратиграфически залегает выше первого яруса, представлен ледогрунтовыми жилами. Крупные клиновидные ледогрунтовые жилы фиксируются в разрезе Кирьяс, более мелкие в разрезе Аганского увала. Клиновидные псевдоморфозы наполнены сизыми, глеевыми суглинками (за исключением разреза Кирьяс) и окаймлены яркоохристой каймой гидроокислов железа.

Третий ярус (на глубине 8 – 10 м), сформированный над ярусом с клиновидными псевдоморфозами, представлен перегнойно-глеевыми палеопочвами с водно-аккумулятивными признаками, возраст которых соотносится с MIS 3 и составляет для разреза Кирьяс 43871 cal. BP, для Аганского увала 27300 л. cal BP.

Четвертый ярус (на глубине 6 – 8 м) представлен псевдоморфозами, перемьятыми суглинисто-супесчаными породами.

Пятый ярус (на глубине 1 – 6 м) для разрезов Кирьяс и Аганский увал представлен лесовидными суглинками, разрез Мега – озерно-аллювиальными супесчаными породами.

Для развития криогенных процессов необходимы определенные условия. Развитию эпигенетических льдов способствовали влажные условия и развитые обширные озерно-болотные комплексы.

Формированию эпигенетического промерзания способствовали отрицательные температуры и безлесные (открытые пространства тундры),

такие проявления образуются после накопления и многолетнего промерзания вмещающих их торфяных толщ. Данный процесс происходит практически исключительно за счет элементарных ледяных жилок, заполняющих морозобойные трещины. Следствием такого генезиса жил является их правильная клиновидная форма, отчетливо выраженная вертикальная полосчатость и четкие контакты с вмещающими горными породами. Похолодание, аридизация климата, по сравнению с ранее существовавшими эпохами, привели к сокращению уровня морского бассейна, что стало преградой для развития покровного оледенения на севере Западно-Сибирской равнины и это способствовало интенсивному промерзанию пород.

Накопление органического вещества в третьем ярусе происходило на переходе из криохрона, на холодных мерзлых породах. В отличии

от предшествующих условий, аккумуляция торфа и органических остатков происходит в термохроне, когда возможна вегетация растений и биоты. Поэтому погребенные гумусовые горизонты, являются маркерами климатических условий, а их погребение свидетельствует о смене климата, не позволяющего накапливаться органическому веществу.

Для торфонакопления в эпоху плейстоцена необходимы были определенные условия. Во-первых, предшествующие мерзлые породы не создавали дренаж, и вода долго находилась на поверхности. Во-вторых, положительные температуры, отогревали лед в водоемах, а водоросли в теплой прогретой воде имели высокую биологическую активность, что позволяло накапливаться первичной органике и зарастанию водоемов пионерной влаголюбивой растительностью.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства ХМАО-Югры № 22-17-20011, <https://rscf.ru/project/22-17-20011>

РАЗВИТИЕ ЭКОСИСТЕМ ААПА БОЛОТ ФЕННОСКАНДИИ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

DYNAMICS OF AAPA MIRES IN FENNOSCANDIA: PALAEOECOLOGICAL ASPECTS

О.Л. Кузнецов
O. L. Kuznetsov

Институт биологии — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук" (г. Петрозаводск, Россия)
kuznetsov@krc.karelia.ru

Аапа болота широко распространены на севере бореальной зоны Евразии и Северной Америки, в Карелии они занимают около 1 млн. га. Массивы развиваются в депрессиях различного генезиса, имеют значительные водосборные площади, что обуславливает обильное увлажнение их центральных вогнутых частей в течение вегетационного периода и формирование в них грядово-мочажинных комплексов. Исследования формирования аапа болот Карелии по данным стратиграфии торфяных залежей показали множественность динамических рядов в ходе их развития (Галкина, 1959; Кузнецов, 1982). Многие из них включают по несколько

стадий (палеосообществ) разного состава и трофности.

Анализ динамических рядов с учетом серий датировок торфов по С14 свидетельствует, что формирование современных грядово-мочажинных комплексов в центральных частях аапа болот в Фенноскандии началось в конце суббореала, начале субатлантического периодов (2-3 тыс. л.н.) (рис. 1) (Kuznetsov, 1986; Foster, Fritz, 1990). Это было обусловлено изменением комплекса палеоклиматических и гидрологических факторов: понижение температур, увеличение количества осадков и усиление увлажнения болот (Елина и др., 1984).

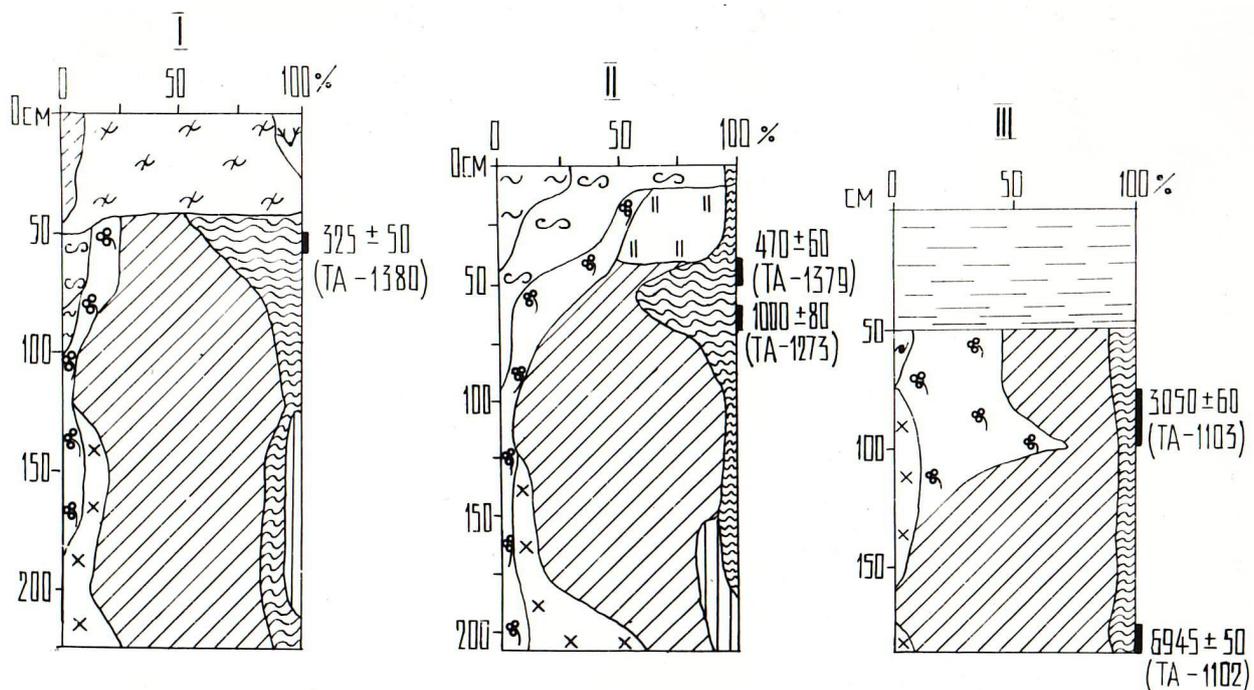


Рисунок 1. Стратиграфия грядово-озеркового аапа комплекса и возраст слоев торфа
I – под кочкой со *Sphagnum fuscum*, II – под грядой со *Sphagnum papillosum*, III – под озерком

В зависимости от гидрогеологических условий залегания аапа болот сильно различается минерализация поступающих на них грунтовых вод, что обуславливает трофность местообитаний и формирующихся сообществ. На начальных фазах развития массивов в бореальный и атлантический периоды на болота поступали более богатые воды с суходолов с не выщелоченными грунтами, они обеспечивали существование разнообразных эвтрофных сообществ, отложивших низинные торфа. Уже в суббореале многие массивы перешли в мезотрофную фазу, представленную травяными и древесно-травяными сообществами, на фоне которых и началось формирование грядово-мочажинных комплексов. Предшественниками таких комплексов чаще всего являлись крупноосоковые ценозы из *Carex lasiocarpa*, *C. rostrata*, отложившие осоковый торф. В современных глубоких мочажинах и озерах аапа комплексов именно торф из остатков этих осок составляет верхний слой, а современные разреженные сообщества из *Carex limosa*, *C. livida*, *Menyanthes trifoliata*, *Utricularia intermedia* низко продуктивные и практически не образуют торфа (Елина и др., 1984). Это необходимо учитывать в исследованиях, направленных на оценку болот в аккумуляции углерода и потоков парниковых газов. Топкие мочажины и озера аапа комплексов являются активными поставщиками метана в атмосферу. В связи с их постоянным стоянием воды в них сформировались своеобразные мелководные биоценозы, содержащие высокое разнообразие водорослей, в первую очередь диатомовых (37 видов), зеленых (40), синезеленых (20) (Штина и др., 1981), а также зоопланктон, включающий представителей Cladocera, Cyclopidae, Rotatoria,

Calanoida. В 1 м³ воды содержится от 6 до 239 тыс. экземпляров Cladocera, они составляют более 90% видов зоопланктона.

С аапа болот происходит большой сток поверхностных вод, которые выносят значительное количество органики, что является одной из причин медленного торфонакопления на них в субатлантический период. Рыхлый сфагновый торф (более правильно называть его преторфом (очесом)) под грядками глубине 40-50 см имеет возраст 300-500 лет (рис. 1). В нем еще идут процессы торфогенеза, скорость разложения клетчатки под грядкой в слоях 30-50 см за три года составила 48-52%. В дальнейшем этот торф будет уплотняться, поэтому мощность этого слоя и период отложения не нужно учитывать при расчетах скорости торфонакопления в субатлантике, иначе мы получим завышенные показатели прироста.

В литературе долгое время аапа болота считались гетеротрофными, их мелкоосоково-вахтовые безмоховые сообщества мочажин трактовались как эвтрофные, а травяно-сфагновые ценозы гряд со *Sphagnum papillosum*, *S. fuscum* как мезотрофные (Цинзерлинг, 1938; Галкина, 1959; Юрковская, 1992). Однако наши исследования агрохимических свойств и минерального состава торфов таких комплексов показали, что их верхние слои, а иногда и вся торфяная залежь, сложенная чаще всего осоковыми торфами, имеют показатели переходных торфов (рис.2). Верхние слои в мочажинах часто имеют высокую зольность, однако в составе золы преобладают кремнезем и окислы железа, а содержание CaO и MgO низкое, они довольно кислые (табл.) (Кузнецов, 1985; Kuznetsov, 1991). Вода мочажин и озерков в основном имеет низкую минерализацию.

Таблица. Агрохимические свойства верхних слоев торфа комплексов аапа болот
Средние значения (n=7-10)

Элемент микро-рельефа	Горизонты, см	R, %	pH	H, мг/ экв.	S, мг/ экв.	V, %	A, %	CaO, % на а.с.в.	MgO, % на а.с.в.
Гряды	0-25	11	4,3	44	26	36	12	0,43	0,21
	25-50	19	4,2	43	33	38	9	0,33	0,14
	50-75	24	4,3	46	22	33	9	0,26	0,14
Мочажины	0-25	22	4,4	33	28	38	17	0,34	0,15
	25-50	24	4,5	33	25	44	15	0,38	0,17
	50-75	28	4,5	36	28	43	11	0,41	0,16

R – степень разложения, H – гидролитическая кислотность, S – сумма обменных оснований, V – степень насыщенности основаниями, A – зольность

Следует отметить, что тип торфа по данным ботанического состава образца часто не совпадает с его химическими свойствами. Это обусловлено особенностями критериев типов торфов в

их классификации (Классификация..., 1951), где все виды осок, ряд трав (вахта, шейхцерия, хвощ) априори считаются эвтрофными, хотя многие из них имеют широкие экологические амплитуды

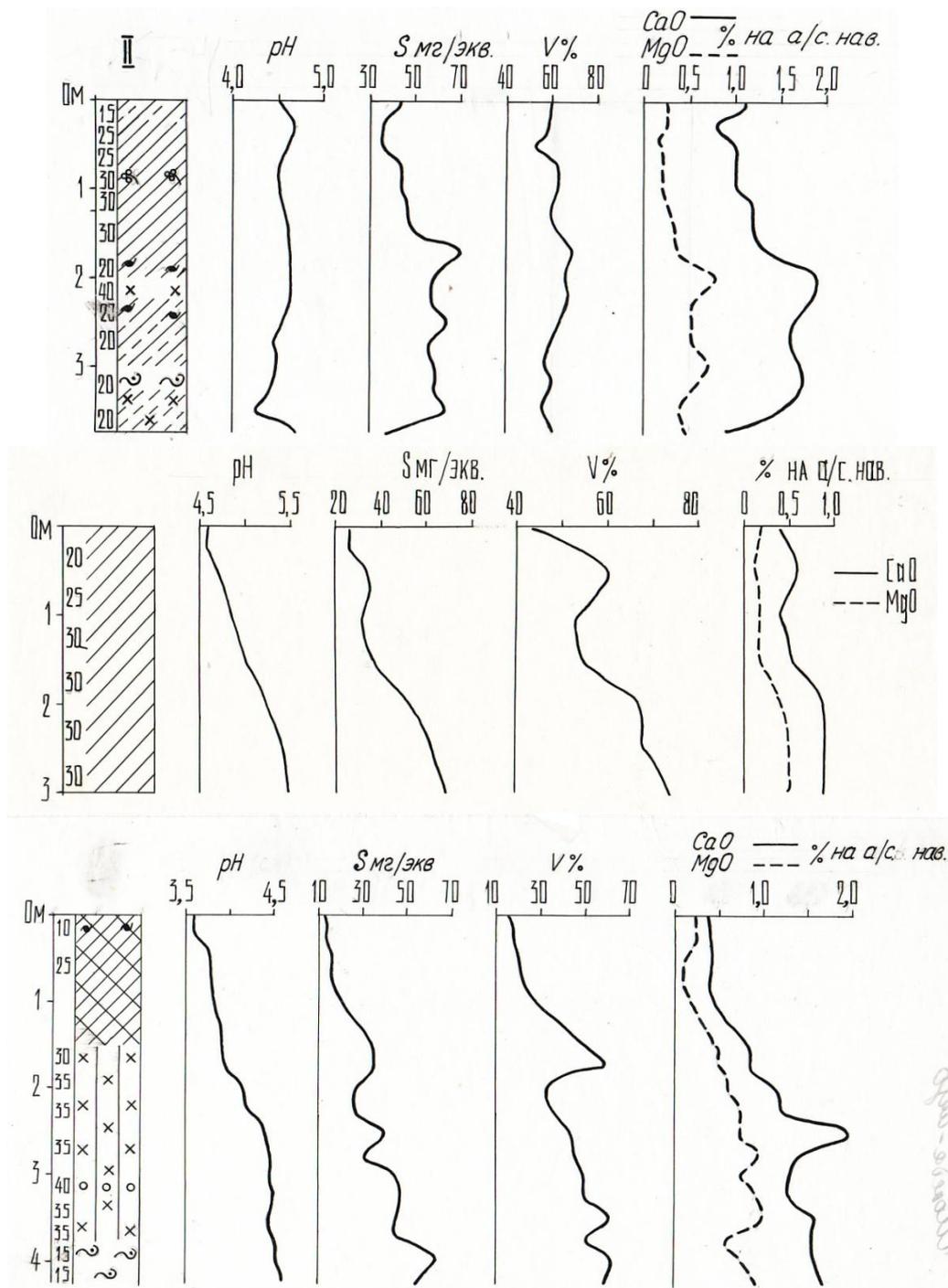


Рисунок 2. Агрохимические свойства торфяных залежей аапа болот северной Карелии
 S – сумма обменных оснований, V – степень насыщенности основаниями

и не являются обязательными индикаторами эвтрофных условий. Поэтому осоковые и травяные торфа при отсутствии в них остатков верховых мхов, согласно классификации, относят к низинным, при этом их агрохимические свойства сильно различаются. Однако только в сочетании трав с остатками эвтрофных мхов такие торфа следует относить к низинным. Это необходимо учитывать при планировании использования аапа болот после осушения.

Отсюда аапа болота с современными мезотрофными комплексами в центре и бедными торфяными залежами следует рассматривать как гомотрофотипные мезотрофные. Таковыми являются и большинство аапа болот онежско-печорского типа (Юрковская, 1992), в которых доминируют осоково-сфагновые мочажины со *Sphagnum jensenii*, *S. majus*, в которых идет активное отложение сфагновых или травяно-сфагновых торфов. В отличие от классических аапа болот

карельского типа, находящихся в настоящее время в устойчивой климаксовой стадии, динамика онежско-печорских аапа болот направлена в сторону олиготрофизации.

По мере нарастания поверхности они могут перейти в верховую фазу, поэтому их современную стадию лучше считать мезотрофной сфагновой грядово-мочажинной и включать их в группу мезотрофных травяно-сфагновых болот, а не в группу аапа типов.

В районах залегания основных и карбонатных пород развиты гомотрофотипные эвтрофные аапа болота. Их центральные комплексы образованы травяно-сфагновыми грядами, моховой ярус которых сложен *Sphagnum warnstorffii*, *S. subfulvum*, *S. centrale*, *S. teres*, в составе травя-

ного яруса доминируют *Carex lasiocarpa*, *Molinia caerulea*, *Trichophorum alpinum*, много видов эвтрофных трав, и травяно-гипновыми мочажинами с моховым ярусом из *Scorpidium scorpioides*, *Warnstorfia exannulata*. Такие массивы распространены не только в Карелии, но встречаются также в Архангельской (Кузнецов и др., 2013), Вологодской (Kutenkov, Filippov, 2019) и Мурманской областях.

В целом динамика аапа болот тесно связана с палеоэкологическими и геологическими условиями в течение голоцена в регионах их распространения, в первую очередь гидрологическим режимом ландшафтов и урочищ. Только значительные изменения климатических факторов смогут изменить ход их развития.

Работа выполнена в рамках гос. задания Института биологии КарНЦ РАН № 122031700449-3 и ВИП ГЗ № 123030300031-6.

1. Галкина Е.А. Болотные ландшафты Карелии и принципы их классификации // Торфяные болота Карелии. Петрозаводск, 1959. С. 3-48.
2. Елина Г.А., Кузнецов О.Л., Максимов А.И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л.: Наука, 1984. 128 с.
3. Классификация видов торфа и торфяных залежей. М, 1951. 68 с.
4. Кузнецов О.Л. Структура и динамика грядово-мочажинных комплексов аапа болот // Бот. журн., 1982. Т. 67. № 10. С. 1394-1400.
5. Кузнецов О.Л. Стратиграфия и химические свойства торфяных залежей аапа болот Карелии // Геология и свойства торфяных месторождений. Калинин, 1985. С. 19-27.
6. Кузнецов О.Л., Кутенков С.А., Чуракова Е.Ю. Аапа болота Архангельской области, их разнообразие и генезис // Водно-болотные угодья и пути миграции птиц в Баренцевом/Евроарктическом регионе и вдоль Зеленого пояса Фенноскандии. Петрозаводск, 2013. С. 122-128.
7. Цинзерлинг Ю.Д. Растительность болот // Растительность СССР. М.; Л., 1938. Т.1. С. 355-428.
8. Штина Э.А., Антипина Г.С., Козловская Л.С. Альгофлора болот Карелии и ее динамика под воздействием естественных и антропогенных факторов. Л.: Наука, 1981. 272 с.
9. Юрковская Т.К. География и картография растительности болот европейской России и сопредельных территорий. С.Петербург, 1992. 256 с.
10. Foster D.R., Fritz S.C. Mire development, pool formation and landscape processes on patterned fens in Dalarna, central Sweden // Aquilo, 1990. Ser. Botanica, 28. P. 15-26.
11. Kutenkov S.A., Philippov D.A. Aapa mire on the southern limit: A case study of the Vologda Region (north-western Russia) // Mires and Peat. 2019. Vol.24. P. 1-20.
12. Kuznetsov O. The structure and age of ridge-hollow aapa mires complexes // Publicat. of Karelian Institute Joensuu Univ., 1986. № 79. P. 73-79.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Pb-210 В ПРОФИЛЕ ТОРФЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

THE DISTRIBUTION SPECIFIC OF Pb-210 IN THE PROFILE OF PEAT CORES

Н.В. Кузьменкова^а, А.Н. Цыганов^б, Ю.А. Мазей^б, Н.Г. Мазей^б, Т.Ю. Репкина^а, Е.А. Еременко^а

N.V. Kuzmenkova^a, A.N. Tsyganov^a, Y.A. Mazei^b, N.G. Mazei^b, T.Y. Repkina^a, E.A. Eremenko^a

^а Институт Географии РАН, e-mail: kuzmenkovanv@my.msu.ru

^б МГУ имени М.В.Ломоносова

Понимание взаимосвязей между абиотическими и биотическими компонентами экосистем является основной задачей экологии, поэтому активно изучается широким кругом исследователей. Особую важность данный вопрос приобретает при рассмотрении функционирования болотных экосистем в контексте глобальных изменений климата (IPCC 2021), что приводит к активному развитию исследований в данной области. Естественные и искусственные радионуклиды, попавшие в окружающую среду атмосферным путем, используются с целью высоко-разрешающей датировки кернов за последние сотни лет.

Неравновесный (атмосферный) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ давно применяется для оценки скоростей отложения наносов в водоёмах. Для естественных радиоактивных маркеров, таких как ^{210}Pb , лимит оценки возраста донных осадков с их использованием равен десяти периодам полураспада. В случае с неравновесным свинцом, период полураспада которого составляет 22 года, лимит оценки равен 220 годам (с высокой степенью достоверности - до 180 лет).

На сегодняшний день используются три основные модели для оценки скорости осадконакопления с использованием неравновесного $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, а именно: 1) модель постоянного осадконакопления (CFCS); 2) модель постоянного потока (CRS); 3) модель постоянной начальной концентрации (CIC) (Corbett and Walsh, 2015). Предложены различные интерпретации данных моделей распределения неравновесного свинца по профилю почв и донных осадков (Chen et al., 2020). Выбор модели расчета определяется аккуратностью отбора проб (четкостью фиксации плотности каждого горизонта), регионом исследования и профильным распределением $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$.

Дополнительным маркером для оценки возраста торфяных отложений служит техноген-

ный ^{137}Cs , который попал в окружающую среду в результате глобальных испытаний ядерного оружия и ядерных катастроф, поэтому периоды его выпадений известны. Техногенный ^{137}Cs выпадал из атмосферы в период с 1954 г. до 1980 г. с максимумами в 1958 и 1963 гг. На Европейской территории СССР ^{137}Cs чернобыльского происхождения выпадал в основном в период с 26 апреля по 15 мая 1986 г. (Putyrskaya et al., 2020). При условии равномерного накопления наносов вертикальный профиль активности неравновесного (атмосферного) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ для датировки донных осадков будет описываться экспоненциальной кривой. Трансформации профиля вертикального распределения $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ способствуют изменения скорости аккумуляции во времени, различия в механическом составе осадков, а также физические и биотурбации (Abril, 2022).

В исследовании использовались торфяные керны, отобранные в Московской (Балашихинский район), Тверской (Центральный-Лесной государственный природный биосферный заповедник) и Архангельской (Мезенский район) областях. Мощность изучаемой части керна из Московской области составила 100 см, из Тверской области - 110 см, из Архангельской - 20 см. Отобранные керны из болот Московской и Архангельской области представляют низинные болота. Тверской керн отобран из верхового болота.

Все отобранные образцы были просушены при $t +105^\circ\text{C}$, перетёрты и упакованы в контейнеры с геометрией «чашка петри» для последующего гамма-спектрометрического анализа. Массы образцов составили от 0,1 г до 6 г. Определение содержания гамма-активных радионуклидов осуществлялось при помощи гамма-спектрометра ORTEC GEM-C5060P4-B с применением полупроводникового детектора из сверхчистого германия (HPGe) с бериллиевым окном и относительной

эффективностью 20%. Время экспозиции проб от 60 000 до 250 000 секунд в зависимости от наблюдаемой интенсивности регистрации искоемых радионуклидов. Неравновесный свинец определяется вычитанием из общей удельной активности самого ^{210}Pb его дочернего изотопа ^{226}Ra . Кривая распределения должна иметь форму экспоненциальной и убывать в соответствии с законом радиоактивного распада.

Результаты исследований показали разную скорость торфообразования за последние 150 лет. Для Московской области была определена скорость торфообразования в 0,42 см/год (Рис. 1). При этом скорость была равномерной во всем исследованном периоде времени. На графике видно, что пики свинца и антропогенного цезия совпадают, что говорит об одинаковом пути их поступления в осадки – атмосферном.

Второй пик на графике $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ указывает на погрешность в пробоотборе. На глубине 50-55 сантиметров проводился добор керна в ту же скважину, что внесло загрязнение в упомянутые горизонты.

В период 1960-2000 гг. сфагновая подстилка стабилизировалась и демонстрировала постепенное снижение поверхностного увлажнения. После этого сельскохозяйственная деятельность в этом районе значительно снизилась, сосновые леса были восстановлены, а плавающая растительность стала более сухой и олиготрофной (Mazei et al., 2023). Полученные результаты свидетельствуют о том, что болотные экосистемы очень чувствительны к климатическим и антропогенным воздействиям и подвергаются относительно быстрой трансформации своего состояния в масштабах веков.

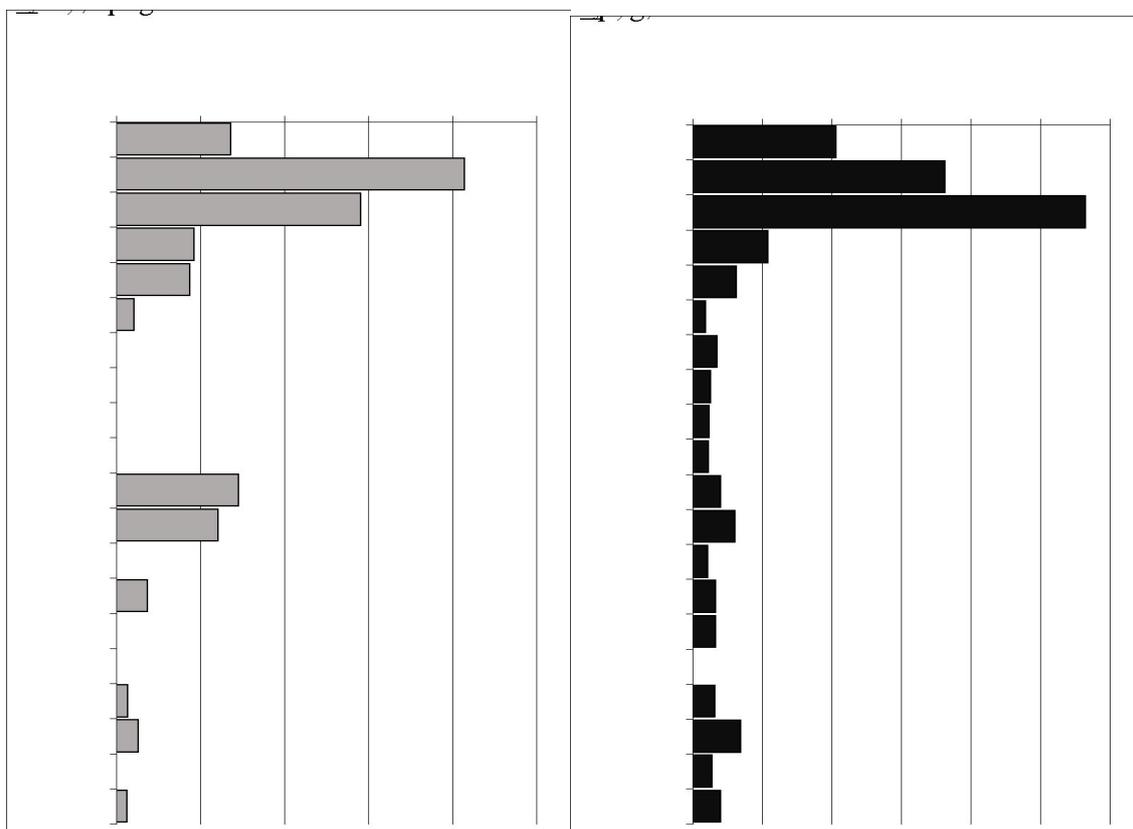


Рисунок 1. Распределение $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ и ^{137}Cs в колонке торфяных отложений Московской области.

Выполненные расчеты для Тверской области показали невозможность достоверного использования радиосвинцового метода. При этом для данного керна очень хорошо сработал метод антропогенного цезия. В высоком разрешении удалось установить скорости торфообразования в периоды до 1963 года (0,3 см/год), 1963-1986 (0,5 см/год), 1986 – наше время (1,3 см/год) (Рис. 2).

Очевиден факт увеличения скорости торфообразования во второй половине двадцатого века, что может указывать на отсутствие антропогенной нагрузки на болото, а также изменение климата, способствующее ускорению торфообразования. Неравновесный свинец не показал классическое распределение, что может быть связано с химией его поведения при условии изменения увлажненности торфа.

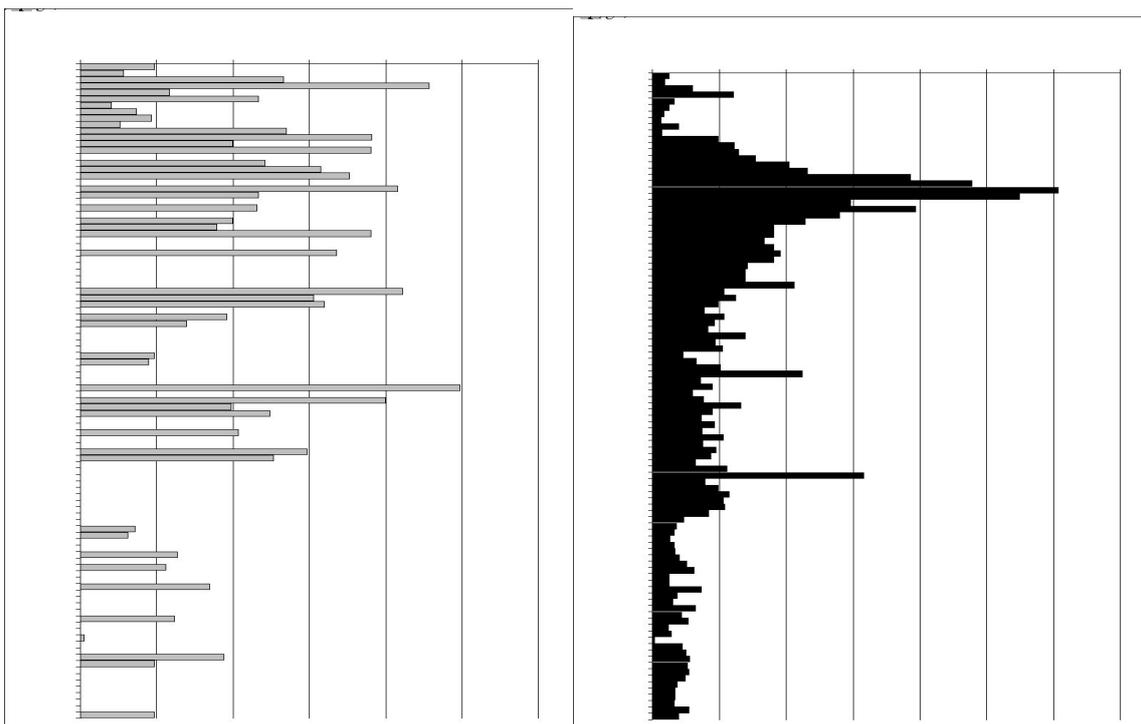


Рисунок 2. Распределение $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ и ^{137}Cs в колонке торфяных отложений Тверской области.

Изучение керна из Архангельской области также показало различный характер распределе-

ния свинца и цезия в профиле торфяного керна (Рис. 3).

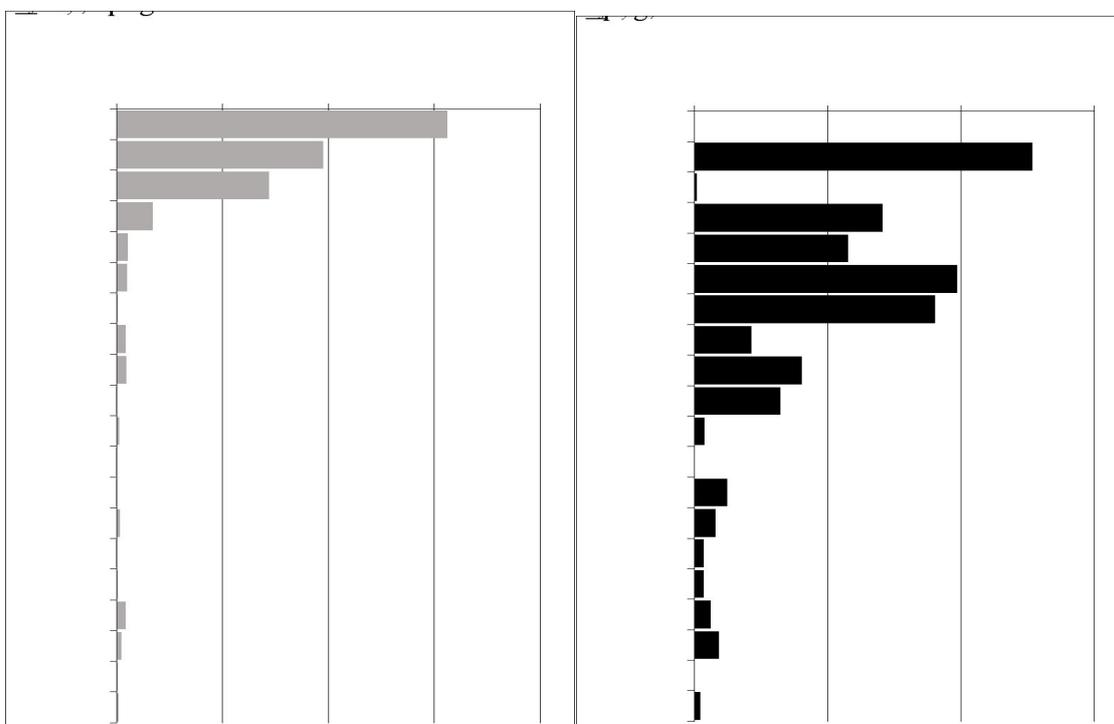


Рисунок 3. Распределение $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ и ^{137}Cs в колонке торфяных отложений Архангельской области.

Анализ распределения ^{210}Pb показал среднюю скорость осадконакопления – 0,13 см/год. При условии постоянного потока неравновесного свинца. Кривая распределения подчиняется экспоненциальному закону, что указывает на то, что колонку можно датировать свинцовым методом. Вычисление возраста каждого отдельного горизонта позволило определить периоды с более высокими и более низкими скоростями. Видно, что в последнее время скорость торфонакопления резко выросла, что может быть связано с природными процессами, в том числе антропогенного характера. В соответствии с расчетами, вся колонка могла накопиться в течении 135 лет. Расхождения с цезиевым методом объясняются неравномерным торфонакоплением, а также погрешностями, связанными с потерей материала во время отбора и пробоподготовки.

Удельная активность обоих радионуклидов также связана с количеством атмосферных осадков. В Тверской области, где их количество максимально (750 мм/год), удельная активность выше, чем в Московской и Архангельской областях (400-500 мм/год). Кроме того, установлено, что керн болотных отложений из Тверской области попал в радиоактивный след Чернобыльской катастрофы. В связи с чем обнаружены высокие значения ^{137}Cs .

Таким образом определено, что при оценке скорости торфообразования с помощью неравновесного свинца необходимо использовать дополнительный маркер. Результаты по трем представленным колонкам демонстрируют различное химическое поведение этих элементов в зависимости от химических параметров окружающей среды.

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024)

1. Abril JM (2022) On the use of ^{210}Pb -based records of sedimentation rates and activity concentrations for tracking past environmental changes. *Journal of Environmental Radioactivity* 244–245: 106823: doi:10.1016/j.jenvrad.2022.106823.
2. Chen J, Zhang X, Navas A, Wen A, Wang X and Zhang R (2020) A study on a ^{210}Pb accumulation-decay model for dating moraine soils to trace glacier retreat time. *Journal of Environmental Radioactivity* 212: 106124: doi:10.1016/j.jenvrad.2019.106124.
3. Corbett DR and Walsh JP (2015) ^{210}Pb and ^{137}Cs : establishing a chronology for the last century. In: Shennan I, Long AJ and Horton BP (eds) *Handbook of Sea-Level Research*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 361–372. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118452547.ch24>: doi:10.1002/9781118452547.ch24.
4. Mazei YA, Tsyganov AN, Ershova EG, Mazei NG, Pimenov VE, Kotlyarova EV, et al. (2023) Multi-Proxy Paleoecological Reconstruction of Peatland Initiation, Development and Restoration in an Urban Area (Moscow, Russia). *Diversity* 15(3): 448: doi:10.3390/d15030448.
5. Putyrskaya V, Klemm E, Röllin S, Corcho-Alvarado JA and Sahli H (2020) Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb . *Journal of Environmental Radioactivity* 212: 106135: doi:10.1016/j.jenvrad.2019.106135.

ПРОЦЕСС БОЛОТООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КАНСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

THE PEATLAND FORMATION PROCESS IN THE KANSK FOREST-STEPPE ZONE (KRASNOYARSK REGION)

А.Б. Михайлова¹

A.B. Mikhailova¹

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

E-mail: arodionova@sfu-kras.ru

Болотные ландшафты являются важными природными архивами для реконструкции климата и растительности за весь период своего формирования.

В Сибирском федеральном университете на кафедре экологии и природопользования проводятся комплексные палеоэкологические исследования болот Канской лесостепи с прилегающим горным обрамлением – северо-западной частью Восточного Саяна (Rodionova, 2018; Mikhailova, 2021).

По болотному районированию (Платонов, 1964) район исследования приурочен к Канскому торфяно-болотному округу с незначительной заболоченностью территории 6-7%. Большинство болот Канской лесостепи образовалось за счет зарастания и заболачивания протоков и стариц

Рассмотрим болотообразовательный процесс на примере болота Рыбное, расположенного на широкой левобережной пойме реки Рыбная (приток р. Кан 1-го порядка).

Основным методом исследования явился ботанический анализ торфа, выполненный по стандартной методике (Тюремнов, 1976), идентификация макроостатков растений выполнена при помощи атласов-определителей (Кац и др., 1977). На основании ботанического анализа торфа была выполнена реконструкция поверхностного увлажнения болота с помощью экологической шкалы Л.Г. Раменского (Раменский, 1956).

Подстилающие торф отложения включают остатки тканей хвоща болотного (*Equisetum palustre* L.), гипнового мха (*Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske), осоки (*Carex* sp.), кору березы (*Betula pubescence* Ehrh.) и единично сосны (*Pinus sylvestris* L.), что указывает на развитие березняка разнотравно-гипнового около 5500 календарных лет назад (далее кал.л.н.) в пойме, которые и в настоящее время распространены в нижнем и среднем течении р. Рыбная.

В период 4900-4000 кал.л.н. на болоте был развит березняк разнотравно-гипновый с

небольшой долей участия сосны, доминантами также являются гипновые мхи, осоки. Фиксируется появление пушицы влагилищной (*Eriophorum vaginatum* L.) и сфагновых мхов, что указывает на снижение увлажнения болота (сыро-луговое 88-90с ступени).

Для этап 3000-4000 кал.л.н. свойственны переменные условия увлажнения (от сыро-лугового до болотного) и увеличением доли сосны. Растительный покров данного временного этапа представлен смешанным разнотравно-гипновым лесом.

В период 2450-3000 кал.л.н. доминантом среди древесных является береза. На болоте произрастает березняк гипново-разнотравный при сыро-луговом увлажнении.

С 2000 кал.л.н. фиксируется резкое увеличение древесной растительности, доминирует береза, отмечено участие ели (*Picea obovata* Ledeb), сосны обыкновенной и сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour). Травяной ярус состоит из осок, вейника, вахты и хвоща. Гипновые мхи полностью отсутствуют. Уменьшение увлажнения до 76-78 ступени (сыро-луговое) способствовало быстрому распространению древесной растительности.

В последние 500 лет при увеличении увлажнения снова доминируют гипновые мхи, наблюдается изреживание древесного яруса, единично фиксируется береза.

При сравнении данных с имеющимися палеоэкологическими архивами были отмечены сходные моменты: в интервале 5700-5300 кал.л.н для болота Большое, расположенного в 80 км на юго-восток от болота Рыбное зафиксировано повышенное увлажнение. В данный временной период начался процесс заболачивания на высокой пойме р.Рыбная. Период 4000-3000 кал.л.н. для болота Большое так же характеризуется контрастными условиями увлажнения, на основании палеоантракологического анализа фиксируются пожарные эпизоды.

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

1. Кац Н.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. Атлас растительных остатков в торфах. – М: Недра, 1977. – 372 с.
2. Платонов, Г.М. Болота лесостепи средней Сибири. – М: изд-во Наука, 1964. – С.3-30.
3. Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков Н.А., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. – М: Государственное изд-во сельскохозяйственной литературы, 1956. – 480с.
4. Тюремнов С.Н. Торфяные месторождения. Изд. 3-е. – М.: Недра, 1976. – 464 с.
5. Mikhailova (Rodionova) A.B., Grenaderova A.V. Peatland Development and Palaeoclimate Records from the Holocene Peat Archive in the Foothills of the Eastern Sayan Mountains// IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, V. 138 (2018), 2018. – P.2-8
6. Mikhailova, A. B., Grenaderova, A. V., Kurina, I. V., Shumilovskikh, L. S., & Stojko, T. G. Holocene vegetation and hydroclimate changes in the Kansk forest steppe, Yenisei River Basin, East Siberia// Boreas. –2021. –V. 50(4). – P. 948-966.

ОСОБЕННОСТИ ДОЛИННОГО БОЛОТООБРАЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА ИШТАН

FEATURES OF VALLEY SWAMP FORMATION: A CASE STUDY OF ISHTAN SWAMP

Д. С. Щуряков
D. S. Schuryakov

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: shuryakoff@yandex.ru

Исследование ботанического состава торфа – важный элемент в палеоэкологических изысканиях, позволяющий определить динамику и особенности болотообразовательного процесса территории. В качестве объекта исследования нами выбрано болото Иштан (57°56'126 N, 84°13'598 E) располагающееся в левобережной пойме р. Обь, в непосредственной близости от с. Иштан и с. Подоба (расположенных на первой надпойменной террасе, к северо-западу и западу от болотного массива соответственно), в южной части Кривошеинского и северной части Шегарского районов Томской области. Болотный массив вытянут с севера на юг на 32 км при максимальной ширине 8 км. Относится к типу низинных пойменных (притеррасных) болот. Площадь около 124 км².

Подробные результаты исследования ботанического состава торфа представлены ранее в отдельной публикации (Щуряков, Волкова, 2023). Главная цель данной работы – представление особенностей болотообразовательного процесса долинного болота на основе построения сукцессионных рядов палеосообществ. Для этого нами проведено бурение трех скважин в различных частях исследуемого болота.

Первая расположена в притеррасной части массива, мощность залежи составляет 4,5 м. Болотообразование данной части отличается от двух других: оно началось с осоково-вахтовых сообществ, а древесные виды на всем протяжении развития болота не играли первоочередную роль в сложении фитоценозов участка. Для данной территории отмечена наиболее частая смена направлений переходов видов торфов (31 из 61). Смена растительных сообществ здесь происходила наиболее интенсивно: нередко в травяные сообщества внедрялись древесные растения, заселялись гипновые и наоборот. По всей видимости, изменения экологических условий, наиболее явными из которых являются увлажнение и трофность, проявлялись здесь наиболее показательно.

Скважина «И2» (3,5 м) расположена в центре согры, на территории которой в ходе геоботанического исследования отмечено наибольшее видовое разнообразие растений. Сообщества залесенного болота занимают более половины площади массива. Здесь отмечается наибольшая роль древесных растений в формировании фитоценозов на протяжении всей истории развития болота. Устойчивые сообщества древесных, преимущественно хвойных, растений исчезали лишь однажды, и в таком случае их заменяло моnodоминантное вахтовое сообщество. Для данного типа болот вахта является важным растением-торфообразователем, по результатам наших исследований – это самый часто встречаемый вид в торфе. На рассматриваемом участке она часто сопутствует древесным растениям, её участие меняется от незначительной примеси до 80%.

Третья скважина, глубиной 4 м, расположена в центральной части массива, занятой сообществом с доминированием *Betula fruticosa* Pall. и *Carex lasiocarpa* Ehrh. Начало болотообразования на этом участке связано с древесными (хвойными) группировками. Данное сообщество отличалось высокой устойчивостью и длительным доминированием. В ходе смены условий (в первую очередь – увлажнения) на участок заселились осоки и гипновые. В результате дальнейшего обеднения условий отмечается период с небольшим участием (до 15%) сфагновых мхов. Далее на участке регистрируется развитие травяного сообщества доминированием *Carex lasiocarpa*. Однако, постепенное изменение структуры фитоценозов, в конечном счете, привело к формированию сложного многоярусного сообщества.

Болотообразовательный процесс для большей части территории массива начался с переувлажнения хвойных древесных сообществ. При общей высокой динамичности смены фитоценозов, наиболее явно данный процесс проявился

для притеррасной части. Развитие растительного покрова долинных болот может идти и проявляться как в направлении усложнения фитоценотической структуры (усложнение ярусности, увели-

чение видового разнообразия), так и в сторону обеднения флористического состава (появление полидоминатных сообществ с *Carex lasiocarpa* или *Menyanthes trifoliata* L.).

Автор выражает глубокую благодарность доценту кафедры ботаники НИ ТГУ, к.б.н. Волковой И. И. за научное руководство, ценные советы и постоянное внимание к работе.

1. Щуряков Д.С. Результаты исследования ботанического состава торфяной залежи болотного массива Иштан // Ботаника и ботаники в меняющемся мире: труды Международной научной конференции, посвященной 135-летию кафедры ботаники и 145-летию Томского государственного университета (г. Томск, 14–16 ноября 2023 г.). Томск: Изд-во Том. ун-та, 2023. С. 323–329.

FEATURES OF MIRE ECOSYSTEM DEVELOPMENT ON CRYOLITOZONE AREA OF THE LOWER AMUR REGION

V.V. Chakov

Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS, Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS

Valid characterization of Pleistocene sedimentary rocks or the surfaces composed by them is now impossible without a contemporary understanding of their structure and age parameters. This is especially important for structural elements of various depressions and river valley complexes of Eastern Siberia and the Far East. Here, geologic descriptions of such elements are still based primarily on stratotypes [7], while over the last 15–20 years, radiometric estimates of associated events are starting to prevail [3]. The attempt to synchronize the events during the formation of individual stratotypes with radiocarbon dates allowed not only to change some visions about the paleogeographic conditions reconstructed based on external genetic similarity of rocks, but also to significantly shift the borders of manifestation of continental glaciations in the Middle and Upper Pleistocene southward [1, 2].

In the last 15–20 years, thanks to the widespread application of modern dating methods in collaborative studies of the Russian Arctic with Western European and American geologists, as well as new approaches to the interpretation of both laboratory data and sedimentological features, it has been possible to somewhat smooth out the major contradictions in the perception of the cryogenesis causes and dynamics in Eastern Siberia and the Far East. Sedimentological, paleontological and geocryological features of paleoclimate were chiefly discussed as the main correlation signal when revising the traditional stratigraphy for the regions. To improve the validity of the chronometric labels, those that were statistically significant and consistent with the main paleoclimatic correlation signal were firstly considered. The chronometric database consists of 132 datings performed by the Russian-Norwegian group through the optically stimulated luminescence (OSL) method, 64 age determinations using a modified radiocarbon method known as modern atomic mass spectroscopy (AMS/C14), and two uranium-thorium datings [1].

In regional schemes, these layers are included in the Karginsky horizon and correlated with the MIS 3 marine isotope stage. It is noted that new datings in the time interval of about 90–60 thousand years ago categorize this horizon as MIS 5, whereas the sediment complex itself, formed by surface glaciers

moving in from the Kara shelf at the indicated time, complies with the Global Glacial Maximum of the MIS 2 era. In Siberia, this era is marked by the subaerial Yedoma ice wedges formation in conditions of sharply continental climate and thick underground glaciation, which puts the stratigraphy of the Upper Neopleistocene of Northwestern Siberia on a level comparable to that of Western Europe. In the instance of AMS/C14, date precision was attained by carefully selecting organic microparticles (e.g., moss fibers or foraminifera shells) to exclude the redeposited material admixture, especially wood, which is easily contaminated with “young” organic carbon.

The paleoreconstruction of the large-scale glacier cover generation and dynamics over vast areas of the Arctic Basin shelf zone throughout the Pleistocene, presented in the materials of specialists from the Helmholtz Center for Polar and Marine Research of Alfred Wegener Institute in Bremerhaven, in collaboration with scientists from the Department of Geosciences of University of Bremen, completely sheds light on such a large-scale distribution of permafrost in Siberia and the Far East [11]. In the latter case, the southern border of permafrost, even on the flat surfaces of the Amur River valley complex, approaches Komsomolsk-on-Amur (Khurmulinskaya mar', 50°N).

Thus, all mire development processes of the plains in the Holocene on most of the lacustrine-alluvial Pleistocene terraces of the Amur River happened, to some extent, during cryogenesis. Its intensity and direction are determinant in the formation of both mire surface topology and soil and vegetation cover.

Materials and methods

Mire ecosystems formed on flat interfluves of the Amur River valley complex and its tributaries of different orders were chosen as research objects on the basis of high-resolution GIS data. At the same time, preference was given to Upper Pleistocene surfaces that had been waterlogged due to thermokarst processes caused by Holocene climate warming. A section of flat waterlogged watershed of the Galbuka River (catchment area of Udy'l' Lake) and Kholanskaya channel were studied (Fig. 1) to identify the waterlogging processes of Upper Pleistocene terraces in close proximity to the

floodplain levels of the Amur River with its specific hydrogeology and hydrological regime of floodplain meadows in the Udył'-Kizinskaya lowland. The Udył'-Kizinskaya lowland is lacustrine-alluvial in origin, with raised bogs covering the left-bank part up to

the bed-rock slopes of the Chayatyn ridge spurs at altitudes of up to 800 m. The peat deposit of such bogs, which ranges in thickness from 2.5 to 3.5 m, is mostly composed of sphagnum phytodetritus with varying degrees of decomposition.

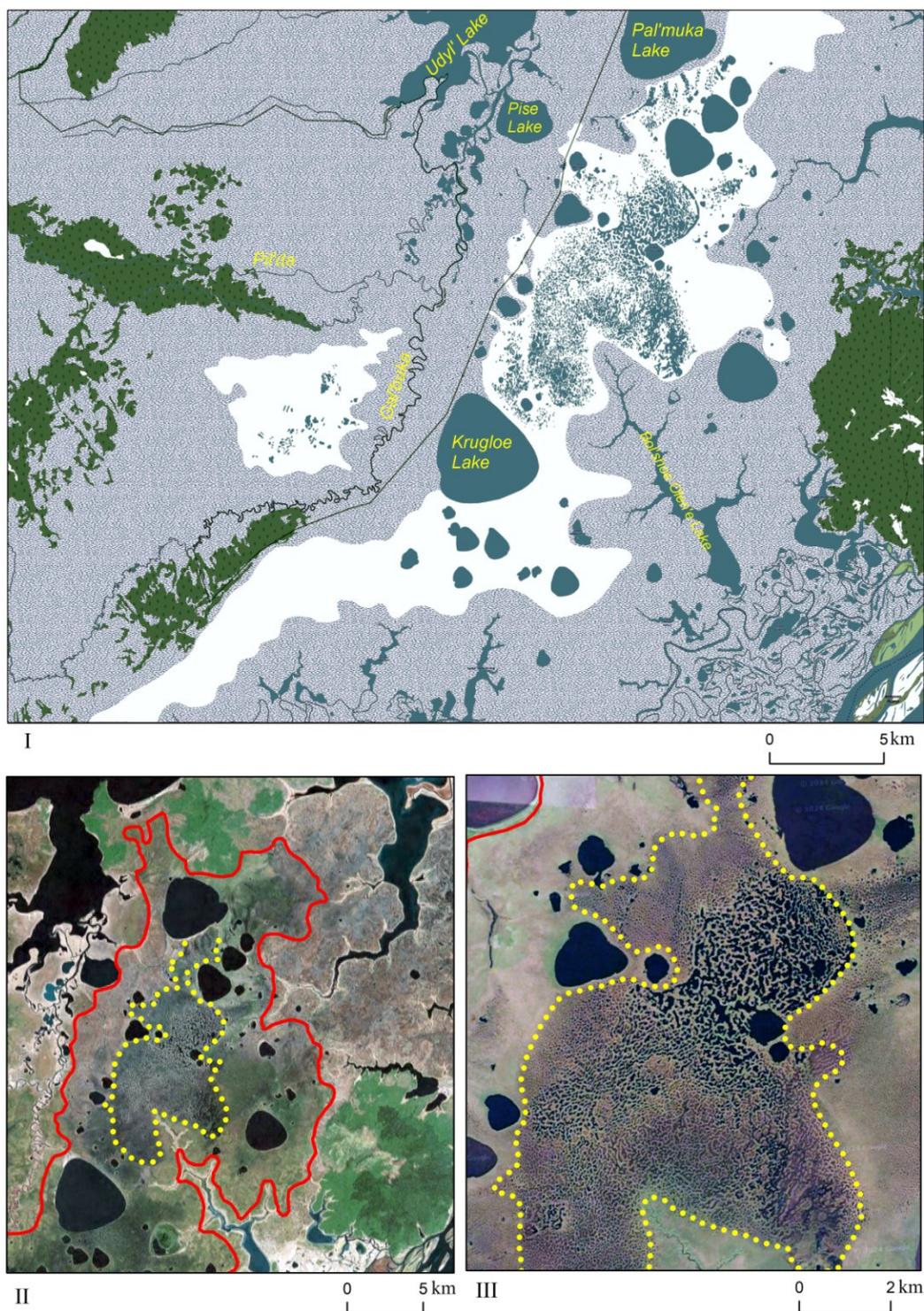


Fig.1. Schematic maps of fragments of mire ecosystem distribution on the Upper Pleistocene surfaces of the left-bank part of the Udył'-Kizinskaya lowland: I – character and features of waterlogging in flat watersheds; II – external (solid line) and internal (dotted contour) borders of complex sphagnum oligotrophic pool-ridge bogs; III – contour of the lake basin in the thalweg part of the flat watershed, where terrestrialisation of the reservoir as it was filled with peat transitioned to the paludification phase.

This typically reflects the variability of hydrothermal environments across formation phases. The majority of the mires studied are extensively inundated and restricted to poorly drained flat waterlogged watersheds [5]. Mires are most common in the alluvial plains of the Nimelen lowland, which serve as catchments for the Nimelen and Amgun' rivers (the Amur River tributaries of the third and second order). The occurrence of waterlogging centers in the Early Holocene, as well as in the first case, is explained by thermokarst-induced overwatering of Upper Pleistocene terrace surfaces [10].

Furthermore, because the Nimelen Lowland is confined to a location with more marked continental climate features, thermokarst processes on mires are still prevalent here today. In particular, the inflow of melt surface water into the contact zones with permafrost, on which the peat deposit is created, causes the latter to slide into the hollow, while also changing bog phytocenoses.

Results and their discussion.

The lower boundary of the Late Pleistocene, defined as the Blake excursion about 100–120 thousand years ago, marked the beginning of the largest northern hemisphere glaciation of the planet with maxima occurring between 18 and 12 thousand BP. First of all, this is because the position of the geomagnetic poles at a given moment and location on the globe, as well as solar activity and magnetic intensity, are all assigned significant roles in the dynamics of climatic parameters. Specifically, it has been determined that during climate cooling, abrupt shifts in the virtual geomagnetic poles (VGP) in the North Pacific at the limits of geomagnetic excursions change from the direct polarity to the reverse polarity and vice versa [9].

The sedimentary permafrost accumulation on lacustrine-alluvial and alluvial plains here was mainly carried out in the form of annual giant aufeis with a total thickness of up to 80 m, given that only mountain glaciations were documented in Eastern Siberia and the Far East. It is linked to water mass outflow to nearby areas and the freezing of watercourses directly in channel sections during extended fall and winter seasons. As a result, during a long time period of the Upper Pleistocene, practically all plain areas in the Lower Amur region's permafrost zone were covered with a sufficiently thick layer (5–15 m) of either ice or frozen ground. During the last fifteen thousand years, the distinctive thermokarst negative relief elements as alas began to form on such surfaces on the northeastern edge of Eurasia throughout the Late Pleistocene interstadial oscillations of Belling and Alleröd. The process was noticeably intensified by the onset of the Holocene, when the underground ice degradation significantly increased. Thus, only in the plains of the boreal zone

of Central Yakutia are there presently over 16,000 such objects with a total area of about 4,500 km² [8]. In warm seasons, particularly during interstadials, shallow warmed pools with mineral concentrations in the bottom zones can occur on developed ice fields, resulting in the formation of thin organomineral active layers. The active layer of the generated alas concentrates when the water areas of primary pools expand and merge to form larger reservoirs, increasing their geochemical capacity and activating the closed system of matter and energy circulation. As a result, the seasonally thawing layer of the pool and the talik underlying it could be subjected to waterlogging processes, i.e. specific vegetation colonization. Since alas and mire habitats are both intrazonal natural formations, the plant species in waterlogging centers generally correspond to phytocenoses that are common in this region. According to paleogeographic and paleomagnetic evidence [4, 6], the primary mire development processes in the Lower Amur region and Southern Okhotomorye began around 12,650–11,500 years ago. In both cases thermokarst phenomena acted as a trigger. At the same time, secondary lacustrine water areas are still widely represented in the waterlogged lowlands of the Amur River valley. Here, their water surface level at depths between 2.0 and 3.5–4.0 m typically conforms to the surface level of mire landscapes. Simultaneously, the central parts of bog massifs with the thickest peat deposits are noted for their maximum depth values in these lakes. The thalweg areas of the former alas are localized by them. We believe that at the maximum values of erosional incision at the interface areas of the floodplain and the lowest floodplain surfaces of the Udyl'-Kizinskaya lowland in the Amur River valley, the mass discharge of water accumulated in them (Fig. 1). This phenomenon is associated with the complete formation of the river network in this area, as well as the development of ravine and gully systems dating back to the early Holocene.

The mire development processes were also similar to the described scheme in the Nimelen lowland in the Polina Osipenko region and as well as the flat waterlogged watershed of the Tugur and Nimelen rivers. However, more continental climate features in this sub-region, along with its close proximity to the Yam-Alin and Duse-Alin high-mountain ranges, which have snow-covered peaks for the majority of the year, produce a unique hydrological regime in nearby watercourses that influences the dynamics of erosion incision of their channels. This circumstance, on the one hand, has caused waterlogging processes to be delayed here dating back up to 8000 years, but on the other hand, it has also led to the most of waterlogging centers being recorded since the lacustrine stage. It should be noted that short-term river water overflows from

one watercourse to another during catastrophic flood formation in one of them have been observed in several places of the lowlands studied thus far [10].

Conclusions

Based on the above, mire formation processes began to appear locally in the permafrost zone of the plains and lowlands of the Lower Amur region locally at the end of the Younger Dryas. Here they are inextricably linked with waterlogging of the Upper Pleistocene surfaces as a result of occurrence of thermokarst processes on the thalweg areas of alas basins.

Mire formation in the valley complexes of the Amur River's second and third order rivers took place later, during the Holocene boreal period. Such complexes, predominantly confined to the mountainous continental region of Khabarovsk Territory, are distinguished by extremely harsh climatic conditions. Within these regions, the processes leading to the mire formation on the flattened surfaces are solely related to the terrestrialisation of shallow reservoirs, as a consequence of the development of sphagnum floating mats and hydrophilic vegetation.

1. Astakhov V.I., Nazarov D.V. Stratigraphy of the Upper Neopleistocene of the north of Western Siberia and its geochronometric rationale // *Regional Geology and Metallogeny*. 2010. No. 43. P. 36-47 (In Russ.).
2. Astakhov V.I. Middle and Late Neopleistocene of the glacial zone of Western Siberia: problems of stratigraphy and paleogeography // *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period*. 2009. No. 69. P. 8-24.
3. Kind N.V. Geochronology of the Late Anthropogenic according to isotopic data. Moscow: Nauka, 1974. 255 p.
4. Peskov A.Yu., Didenko A.N., Karetnikov A.S., Klimin M.A., Arkhipov M.V., Kozhemyako N.V., Tikhomirova A.I. Peat deposits as a new source of paleomagnetic record in the Holocene on the example of the excursion "Etrussia" // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2023. Vol. 512. No. 1. P. 127-137. DOI: 10.31857/S2686739723600583
5. Prozorov Yu.S. Mires of the Lower Amur lowlands. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1974. 211 p.
6. Razhigayeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A., Chakov V.V., Klimin M.A., Mokhova L.M., Zakharchenko E.N.. Stratigraphy of the watershed peatland and development of the natural environment of Bolshoy Shantar Island in the Late Glacial-Holocene. // *Pacific Geology*, 2021. Vol. 40. No. 3. P. 85-102. DOI: 10.30911/0207-4028-2021-40-3-85-102
7. Saks V.N. Quaternary period in the Soviet Arctic. L.-M.: Publishing house of the Ministry of Marine and River Fleet of the USSR, 1953. 627 p.
8. Solovyov P.A. Permafrost zone of the northern part of the Lena-Amga Interfluve. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1959. 143 p.
9. Bucha V. Direct relations between solar activity and atmospheric circulation, its effect on changes of weather and climate // *Studia geoph. et geod.* 1983. V. 27. P. 19-45.
10. Chakov V.V., Zakharchenko E.N., Parkhomchuk E.V. Dynamics of peat accumulation processes in the areas of the periglacial zone of the basin watershed of Tugur-Nimelen rivers // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The Current State of Natural Complexes and Their Protection. Regions of New Development*" 2021. C. 012010
11. Geibert W., Matthiessen J., Stimac I., Wollenburg J., Stein R. Glacial episodes of a freshwater arctic ocean covered by a thick ice shelf // *Nature*. 2021. Vol 590. P. 97-102.

**Remote sensing and marsh mapping.
Processing of Unmanned
Aerial Vehicle data in carbon
balance assessment**

**Дистанционное
зондирование
и картографирование
болот.
Обработка данных
с БПЛА в оценке
углеродного баланса**

ЛИДАРНЫЕ И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ В ИЗУЧЕНИИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА БОЛОТ: ОПЫТ, ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И БУДУЩИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

LIDAR AND MULTISPECTRAL DATA IN STUDYING THE CARBON BALANCE OF PEATLANDS: EXPERIENCE, OBTAINED RESULTS, AND FUTURE PERSPECTIVES

*Д.В. Ильясов, А.А. Каверин, А.В. Ниязова, Ю.В. Куприянова, А.Ф. Сабреков,
Е.А. Заров, И.В. Филиппов, Е.Д. Лапшина*
*D.V. Ilyasov, A.A. Kaverin, A.V. Niyazova, I.V. Kupriianova, A.F. Sabrekov, E.A. Zarov.,
I.V. Filippov, E.D. Lapshina*

ФГБОУ ВО Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск, Россия)
d_ilyasov@ugrasu.ru

Болота – важный компонент бюджета углерода планеты: занимая лишь 3.5 – 5% поверхности суши, они запасают в виде торфа более 500 ГтС (Gorham 1991), являются одним из крупнейших естественных источников метана в атмосферу (Fung, et al. 1991, Mitsch 2016), непрерывно накапливают и консервируют диоксид углерода атмосферы в виде торфа (Qiu 2020). Запасающая функция болот в значительной степени зависит от текущих климатических условий. Понимание особенностей функционирования болот как компонентов бюджета углерода крайне актуально в контексте современных климатических изменений и поиска путей адаптации к ним, что было отмечено на национальном (Распоряжение...) и международном (Lee, et.al. 2023) уровнях.

Болота являются чрезвычайно гетерогенными природными объектами как в пространстве, так и во времени: изменчивость запасов фитомассы, потоков парниковых газов, условий увлажнения и других экологических факторов может достигать одного или нескольких порядков в масштабе отдельных элементов мозаики их растительного покрова. Важную роль в исследовании болот играют данные дистанционного зондирования (ДДЗ), которые помогают обобщать полученные наземные данные в виде картографических материалов и интерполировать их во времени. Особый вклад в получение высокодетальных ДДЗ в последнее десятилетие вносят беспилотные летательные аппараты (БВС – беспилотное воздушное судно): съемка может выполняться в видимом, мультиспектральном, термальном и лидарном диапазонах; в отличие от спутниковых ДДЗ съемка практически не ограничена условиями облачности и обладает большим пространственно-временным разрешением; кроме того,

съемка может быть выполнена практически для любого участка земной поверхности (Anderson, et.al. 2013).

В октябре 2022 года в Югорском государственном университете в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2022-169) и реализации национального проекта «Наука и университеты» была организована молодежная лаборатория «Геоинформатики экосистем». Одной из основных целей лаборатории является оценка пространственно-временной изменчивости компонентов углеродного баланса болотных экосистем при помощи БВС. Для достижения цели сформировано несколько **направлений исследований**, сосредоточенных на различных участках Мухринского болотного массива: 1) типологическое картографирование болотных экосистем на основе мультиспектральной съемки 2) создание системы дистанционной оценки запасов фитомассы травяно-кустарничкового яруса болот 3) верификация системы дистанционной оценки запасов древесной фитомассы облесенных участков болот 4) создание системы дистанционной оценки уровня болотных вод 5) создание высокодетальных карт водосборов и линий гидрологического стока для оценки выноса растворенного углерода 6) разработка системы дистанционной оценки температуры торфяной залежи 7) оценка возможностей использования портативных газоанализаторов для измерения потоков диоксида углерода при помощи БВС.

В рамках полевого сезона 2023 года на Мухринском болотном массиве осуществлена мультиспектральная (МС), лидарная и тепловизионная (ТВ) съемка типологически-различных участков в границах полигона размером 2×2 км

(координаты центра N60°53'29.42", E68°40'33.99"). В таблице 1 этот участок обозначен «полигон»; кроме этого, в границах полигона была осуществлена съемка: 1) зоны нарушения растительного покрова при строительстве линии электропередач («ЛЭП») 2) высоты древесного покрова на участке сосново-кустарничково-сфагнового сообщества («рям») 3) неоднородностей подстилающей поверхности 50-метровой зоны вокруг вышек eddy covariance (одна вышка установлена в грядово-мочажинном комплексе, другая – в ряме) 4) спектральных и морфологических характеристик растительного покрова на участках измерений потоков парниковых газов камерным

методом («КМ»). Ниже приведен список выполненных задач и первых результатов, удовлетворяющих направлениям исследований, описанных выше.

Направление 1. Съемка всей территории болотного полигона преследовала задачу типологического картографирования: в результате была создана высокоточная карта гряд и мочажин, карта преобладающего типа растительности в мочажинах (с разделением на шейхцериевые и пушициевые), карта ключевых типов болотных фаций (рям, рямово-мелко-мочажинный комплекс, грядово-мочажинный комплекс, открытое болото с редкой сосной, грядово-топяной комплекс).

Таблица 1. Календарь и характеристики съемки при помощи БВС, выполненной в рамках полевого сезона 2023 года на болотном массиве Мухрино (расшифровка наименований участков съемки представлена в тексте выше).

Дата	16-20.05	18.06	02-07.07	14-16.08	07.09	18-22.09	05-08.10
Тип съемки	Лидар МС	Лидар МС	Лидар МС	Лидар МС	ТВ МС	Лидар МС	Лидар МС
Участок	Полигон КМ	Полигон КМ	Полигон ЛЭП КМ	Зона вышек Рям	Полигон	Полигон Зона вышек	Зона вышек

Направление 2. Данные, полученные на участках съемки КМ (как лидарные, так и мультиспектральные) были использованы для параметризации простейших регрессионных моделей связи запасов фитомассы травяно-кустарничкового яруса болотной растительности с дистанционно определяемыми характеристиками: шероховатостью подстилающей поверхности и спектральными индексами. В результате удалось обнаружить достаточно тесную корреляцию ($R^2=0.6$) между запасами фитомассы, средней высоты растительного покрова и суммарным GRVI (Ильясов и др., 2023).

Направление 3. Лидарная съемка на участке рьяма позволила осуществить верификацию высот отдельных деревьев на участке болотного массива. Коэффициент детерминации линейной регрессии между высотой отдельных деревьев, оцененной при помощи прямых и дистанционных лидарных измерений оставил 0.9 (Ilyasov et al., 2023).

Направление 4. Также на основе лидарной съемки территории болотного массива были определены участки открытой водной поверхности и их абсолютные высоты. При помощи метода ординарного кригинга была восстановлена поверхность зеркала воды, для участков с УБВ ниже поверхности почвы. Средняя невязка карты УБВ с данными прямых измерений, полученных при помощи пьезометров составила 10 см.

Направление 5. На основе лидарной съемки построены сетки линий стекания что позволило

распознать основные водотоки, питающие ручей, в свою очередь дренирующий изучаемый участок болотного массива (руч. «Блойтеновский»). На основании сетки линий стекания была посчитана площадь водосбора, которая составила 1 154 769 кв. м., что несколько выше предыдущих расчетов с использованием данных спутниковой съемки (1 005 388 кв. м.). Существенные расхождения в границах водосбора данной и предыдущей итерации были обнаружены в южной и юго-восточной части водосбора.

Направление 6. Построена карта пространственных неоднородностей температуры подстилающей поверхности территории болотного массива. В дальнейшем планируется произвести наземную калибровку полученных данных с целью восстановления температуры торфяной толщи.

Направление 7. Планируется к апробированию использование системы дистанционной оценки концентрации диоксида углерода в атмосфере при помощи БВС, оснащённого системой оценки скорости и направления ветра при помощи ультразвукового 3D анемометра. Полевые работы запланированы на третий квартал 2024 года.

Развитие новых направлений экологических исследований с использованием БВС в Югорском государственном университете в дальнейшем позволит методически усовершенствовать сбор информации о ключевых экологических характеристиках болотных экосистем, увеличить

обеспеченность данными, необходимыми для идентификации параметров математических моделей, изучить пространственно-временные особенности изменчивости компонентов углеродного

баланса. На этой основе в дальнейшем будут построены системы дистанционный экспресс-оценки запасов и потоков углерода в естественных и нарушенных экосистемах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты». Авторы выражают благодарность всем организаторам и участникам полевых работ 2023 года, также всем, кто оказал консультационную и неформальную поддержку членам научного коллектива.

1. Ильясов Д.В., Ниязова А.В., Каверин А.А., Усик А.А. Связь запасов фитомассы травяно-кустарничкового яруса олиготрофного болота с данными мультиспектральной и лидарной БПЛА съемки // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 370. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a
2. Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2022 г. № 3240-р об утверждении важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» и плана мероприятий («дорожной карты») по реализации первого этапа (2022 – 2024 гг.) важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».
3. Anderson K., Gaston K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. V. 11. N. 3. P. 138–146.
4. Gorham E. Northern Peatlands: Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming // *Ecological Applications*. 1991. V. 1. No. 2. P. 182–195. <https://doi.org/10.2307/1941811>.
5. Fung I. et al. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1991. V. 96. No. D7. P. 13033–13065.
6. Ilyasov D.V., Kaverin A.A., Zhernov S.N., Glagolev M.V., Niyazova A.V., Kupriianova I.V., Filippov I.V., Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Lapshina E.D. Estimation of tree cover height on oligotrophic bog based on UAV lidar surveying // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2023. 14(4): 237–248
7. Lee H., Calvin K., Dasgupta D., Krinmer G., Mukherji A., Thorne P., Zommers, Z. Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Longer report. IPCC. 2023.
8. Mitsch W. J. Wetlands and climate change // *National Wetlands Newsletter*. 2016. V. 38. No. 1. P. 5–11.
9. Qiu C. The role of northern peatlands in the global carbon cycle for the 21st century // *Global Ecology and Biogeography*. 2020. V. 1. P. 1–18.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ С БВС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ

USING UAV DATA FOR THE IMPLEMENTATION OF CLIMATE PROJECTS

*А.А. Каверин¹, Д.В. Ильясов¹, Г.Н. Ганасевич¹, В.Р. Курбатова¹, А.А. Ернова¹
A.A. Kaverin¹, D.V. Ilyasov¹, G.N. Ganasevich¹, V.R. Kurbatova¹, A.A. Ernova¹*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет» (г. Ханты-Мансийск, Россия)
E-mail: A_Kaverin@ugrasu.ru

Климатические проекты в России, направленные на сокращение углеродного следа, интегрируют беспилотные воздушные суда (БВС) для повышения эффективности и экологической устойчивости исследований. Это соответствует государственной политике, закрепленной в Федеральном законе (ФЗ № 296 от 2 июля 2021 г.) и климатической доктрине РФ (Указ Президента РФ № 812 от 26 октября 2023 г.). Применение БВС, например моделей DJI, с подвесами, такими как лидары, мультиспектральные камеры и газоанализаторы, помогает в мониторинге и управлении землепользованием, а также в выявлении и отслеживании загрязнений. Эти технологии играют важную роль в реализации национальных климатических инициатив и достижении экологических целей.

В климатических проектах БВС могут участвовать на всех этапах, от планирования до оценки эффективности и контроля за соблюдением экологических стандартов, повышая оперативность и точность сбора и анализа данных. В Реестре углеродных единиц РФ утверждено 11 методологий климатических проектов и 6 предварительных стандартов (Реестр углеродных единиц, 2024) для модернизации производственных циклов, охраны лесов, обводнения торфяников и оценки сельскохозяйственных земель, однако использование БВС редко подробно описано. Методологии климатических проектов включают описание применимости, границ проекта, углеродных пулов и источников парниковых газов, базового сценария, принципа дополнительности, плана мониторинга и оценки выбросов от утечек.

Применение БВС, например, на этапе разработки плана мониторинга, как в методике по обводнению торфяников (Методология реализации климатического проекта № 0016, 2024), способствует созданию детальных карт растительности и оценки состояния торфа. БВС также могут быть использованы для мониторинга уровня болотных вод и измерения выбросов парниковых газов по всей территории реализации климатического проекта.

Методология по лесовосстановлению (Методология реализации климатического проекта № 0010, 2024) включает возможность использования БВС для аэрофотосъемки, создания цифровых моделей местности и лазерного сканирования с помощью LiDAR, что повышает эффективность мониторинга и сокращает необходимость наземных площадок на 50%. БВС также может применяться для оценки запасов углерода, состояния и объема биомассы, и анализа пожарной опасности, открывая новые перспективы для мониторинга лесовосстановления и углеродного баланса.

Для обеспечения точности и надежности результатов данные БВС необходимо верифицировать наземными измерениями. Такой подход создает комплексную систему мониторинга, повышая эффективность климатических проектов. БВС являются ключевым инструментом для увеличения поглотительной способности экосистем на всех этапах реализации климатических проектов, от вычисления базовой линии до анализа рисков. Дальнейшее развитие и интеграция БВС углубят их вклад в борьбу с изменением климата и его последствиями.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

КАК ОПРЕДЕЛИТЬ ТОРФЯНОЙ ПОЖАР ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ

HOW TO DETECT A PEAT FIRE USING REMOTE SENSING DATA

М.А. Медведева¹, В.Ю. Иткин^{1,2}

М.А. Medvedeva¹, V.Yu. Itkin^{1,2}

¹ Институт лесоведения Российской академии наук, Московская обл., 143030, Россия,
e-mail: eveeza@yandex.ru

² Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, 119991,
Россия, e-mail: itkin.v@gubkin.ru

Изменение климата сопровождается увеличением частоты экстремальных метеорологических явлений, следствием которых является рост вероятности природных (ландшафтных) пожаров. Среди них выделяются торфяные или, в случае лесных площадей, т.н. подземные лесные пожары. Торфяные пожары отличаются спецификой течения, длительностью, загрязнением воздуха опасными для человека веществами, выбросом в атмосферу большого количества диоксида и монооксида углерода, сажи (включая органический и черный углерод) и другими экологическими последствиями. Торфяные пожары лидируют среди природных пожаров по величине сгораемого материала на единицу площади: потери углерода торфа могут значительно превышать потери растительной биомассы. Поступление парниковых газов в атмосферу в результате торфяных пожаров может достигать в отдельные годы 15% и более всех антропогенных эмиссий, а текущие оценки долгосрочных средних выбросов превышают 0,5 Гт CO₂ в год. Планетарные последствия чаще связывают с лесоторфяными пожарами в юго-восточной Азии, однако не меньшее значение могут иметь торфяные пожары в Северном полушарии. Заглубление огня при торфяном пожаре приводит к повреждению и выгоранию сосущих корней с последующей частичной или полной гибелью древостоя. Из-за более низкой температуры горение торфа образует больше черного углерода, попадание которого в атмосферу усиливает парниковый эффект, а последующее выпадение – таяние снежно-ледового покрова, в т.ч. в Арктике. Из-за неполного сгорания в атмосферу поступает большое количество мелкодисперсных частиц, крайне опасных для здоровья человека – причина избыточной смертности после пожаров в центре Европейской России в 2010 году.

В России, где по данным ГИС «Болота России» ИЛАН РАН торфом покрыто более 1/5 территории, торфяные пожары могут возникать

повсеместно от тундр до степей, но наиболее часто – в лесной зоне. В сухие годы могут гореть и неосушенные болота, однако наиболее часто – осушенные и заброшенные пользователем торфяники. Горение растительного материала на болотах и осушенных торфяниках не всегда переходит в торфяные почвы, превращая пожар в торфяной. Разделение пожаров на торфяниках и на собственно торфяные пожары принципиально важно для оценки потерь углерода, выброса продуктов горения, определения экологических последствий, выбора подходов к их устранению. Сложность выявления торфяных пожаров и определения потерь углерода торфа отмечается Руководствами МГЭИК (IPCC) 2006, 2014 и 2019 гг. и является причиной недоучета этого важного источника парниковых газов.

На базе ранее проведенных работ по выявлению отличий лесных и торфяных пожаров путем анализа последствий обширных лесных и торфяных пожаров в центре европейской части России в 2010 г, по результатам которых удалось выявить параметры, отличающие торфяные пожары от других природных пожаров (Сирин и др., 2022; Медведева и др., 2023; Sirin, Medvedeva, 2022), нами предлагается метод детектирования торфяных (подземных) пожаров на основе анализа дистанционных характеристик разных типов пожара – площадей в рамках границ торфяников и вне их (рис.1 и рис.2). Характеристики пожарной активности получены на основе спутниковых данных о тепловых аномалиях спектрометра MODIS низкого пространственного разрешения 1 км. Данные предоставлены Центром коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» Института космических исследований Российской академии наук (<http://ckp.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2019). Особенностью применения этих данных в нашей работе является использование как стандартных показателей, так и производного показателя «длительность пожара».

Проведенные исследования показали, что характеристики пожаров, такие как минимальные, максимальные и средние значения радиационной мощности (FRP – Fire Radiative Power) (Freeborn et al., 2014) и температуры MOD14/MYD14, общая площадь пожара, площадь, занятая до пожара лесом, а также длительность горения (Лупян и др., 2020), могут использоваться для отнесения пожара к подземным или поверхностным. Для подтверждения факта возгорания торфа на пройденных огнем площадях использовались наземные исследования 2017 года.

В поиске наилучшего разделения двух типов пожаров был разработан оригинальный индекс торфяного пожара для определения наилуч-

шего сочетания нескольких параметров, включая максимальные значения FRP, среднюю температуру горения, продолжительность горения и площадь возгорания. Предлагаемая модель индекса торфяных пожаров показывает степень уверенности в том, что данный пожар является торфяным. В результате проведенных расчетов был определен порог индекса 0,52, выше которого выявляются торфяные пожары с вероятностью 76% от торфяных (почвенных) и в большинстве случаев они действительно торфяные – 95%, и порог индекса 0,1, ниже которого выявляются поверхностные пожары с вероятностью 66% и в большинстве случаев они действительно поверхностные – 94%.

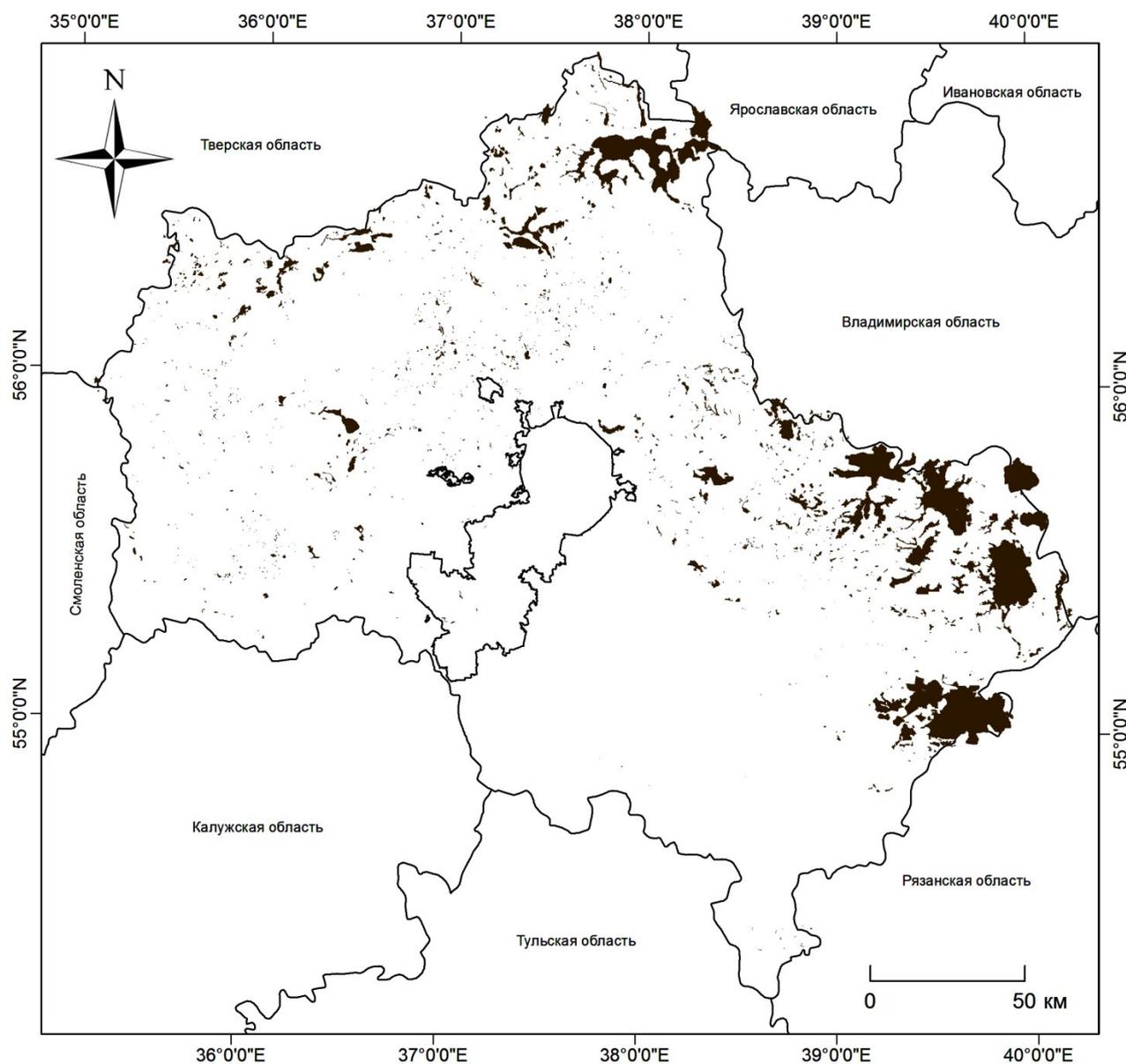


Рис.1. Торфяники Московской области (Сирин и др., 2014).

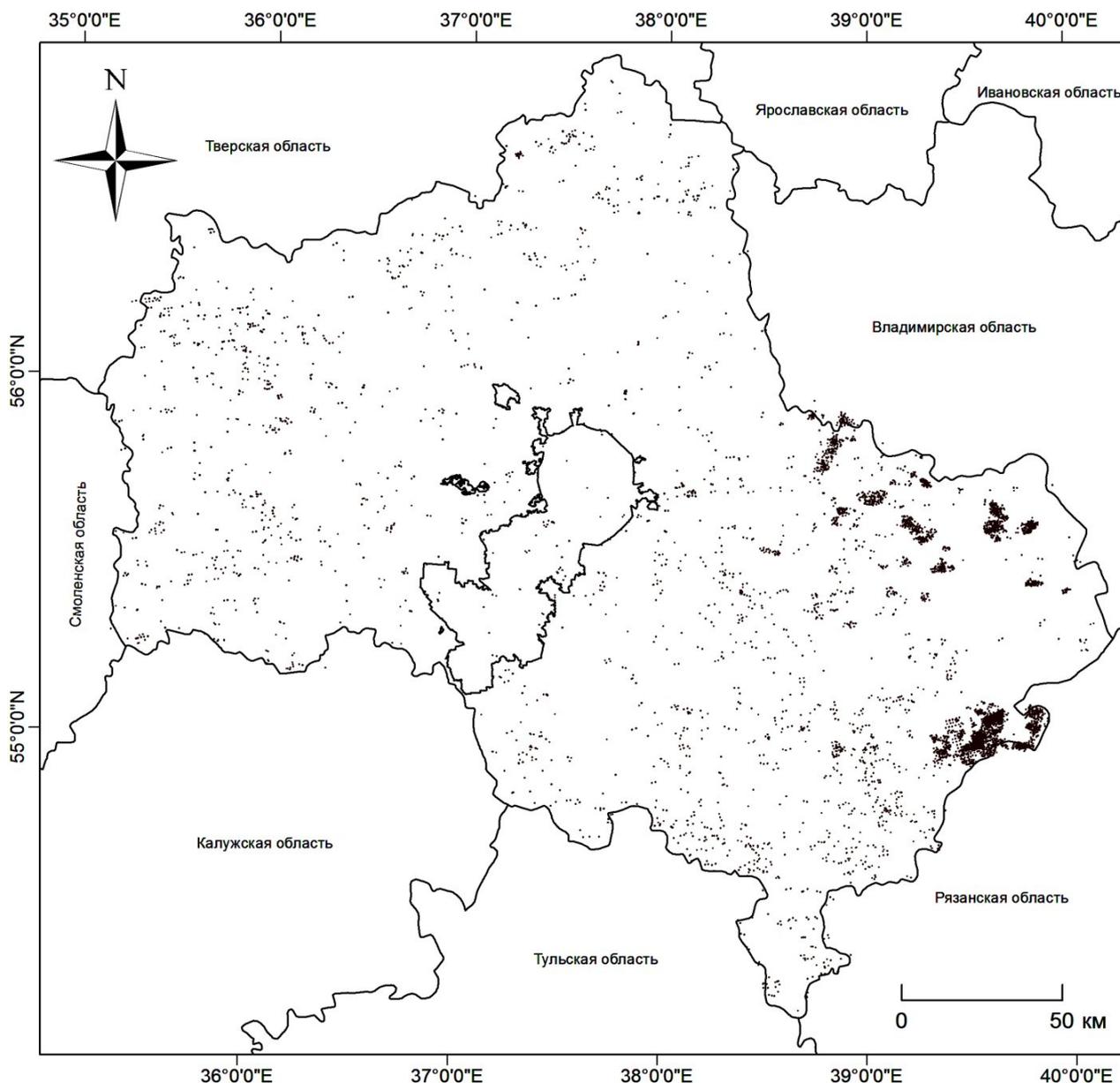


Рис. 2. Температурные аномалии Московской области 2010 по данным MODIS.

Необходимо учитывать, что доля выявленных торфяных и поверхностных пожаров может определяться как по суммарному количеству пожаров, так и по общей площади. Дополнительная информация о качестве идентификации пожаров была получена в расчете на единицу площади, занятой пожарами каждого типа. С учетом того, что торфяные пожары имеют большую площадь, было определено, что доля по площади выявляемых торфяных пожаров по тем же критериям получается значительно выше, чем доля по количеству.

В результате анализа доли выявленных пожаров как по количеству, так и по площади, было определено, что наиболее эффективным по сравнению с другими показателями оказывается разработанный оригинальный индекс торфяного пожара, позволяющий выявлять с высокой

вероятностью не только приоритетные в данной работе торфяные пожары, но и определять поверхностные, что уменьшает область неопределенности. Обнаружение торфяных пожаров и их отделение от других пожаров важно для решения ряда задач, включая оценку потерь углерода и выбросов парниковых газов.

Результаты требуют проверки на примере других территорий, однако весьма убедительно свидетельствуют о возможности использования дистанционных данных для детектирования торфяных пожаров. В качестве конечного результата исследований мы ожидаем получить универсальные пороговые значения некоторых показателей пожарной активности, использование которых позволит выявить торфяные пожары в районах, где расположение торфяников плохо изучено.

Работа проводилась при поддержке Российского научного фонда (проект 23-74-00067).

1. Лупян Е.А., Балашов И.В., Сенько К.С., Бурцев М.А., Стыценко Ф.В., Мазуров А.А. 2020. Обновленный многолетний ряд данных о пожарах на территории России по данным MODIS коллекции 6. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции. Москва, ИКИ РАН, 16–20 ноября 2020 г, С. 341. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a
2. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 2019. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг»). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 16, № 3, С. 151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170
3. Медведева М.А., Иткин В.Ю., Сирин А.А. 2023. Анализ показателей температурных аномалий для выявления торфяных пожаров. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 20, № 6, С. 92-116. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-92-116
4. Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О.П., Глухова Т.В. 2014. Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения. Лесоведение. № 5, С. 65-71.
5. Сирин А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю., Макаров Д.А., Коротков В.Н. 2022. Выявление торфяных пожаров для оценки эмиссии парниковых газов. Метеорология и гидрология. № 10, С. 33-45. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-33-45
6. Freeborn P. H., Wooster M. J., Roy D. P., Cochrane M. A. 2014. Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation. Geophys. Res. Lett. V. 41, Issue 6, pp. 1988-1994. DOI: 10.1002/2013GL059086
7. Sirin A., Medvedeva M. 2022. Remote Sensing Mapping of Peat-Fire-Burnt Areas: Identification among Other Wildfires. Remote Sensing. V. 14, Article 194. DOI: 10.3390/rs14010194

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ ПО ОБВОДНЕНИЮ ОСУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ

USE OF REMOTE SENSING DATA IN THE IMPLEMENTATION OF CLIMATE PROJECTS FOR WATERING DRAINED PEATLANDS

T. V. Orlov^{1}, K. L. Shakhmatov², Yu. V. Fursa³, M. V. Arkhipova¹, V. V. Bondar¹*
T.V. Orlov^{1}, K.L. Shakhmatov², Yu.V. Fursa³, M.V. Arkhipova¹, V.V. Bondar¹*

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (г. Москва, Россия)

² Тверской Государственный Технический Университет (г. Тверь, Россия)

³ ООО «Центр технологий устойчивого развития» (г. Москва, Россия)

*E-mail: tim.orlov@gmail.com

В последние два десятилетия существует задача оценки выбросов парниковых газов (ПГ) с территории осушенных торфяников, что, в первую очередь, необходимо для точного понимания вклада этих уникальных экосистем в проблему изменения климата. Данная задача становится все более актуальной для России, поскольку с 2023 г. активно развивается добровольный рынок углеродных единиц, в котором рассматриваются Климатические проекты и, в частности, по вторичному обводнению ранее осушенных торфяных месторождений (Гордеева, Фурса, 2023).

Одним из решений данной задачи является метод использования классов GEST для картографирования нарушенных торфяников, достаточно полно описанный Джоном Ковенбергом с соавторами в 2011 г. (Couwenberg et al., 2011). В дальнейшем он был развит многими авторами и получил наиболее полное обобщение в рамках разработки Методического руководства для оценки эмиссии парниковых газов с нарушенных торфяников (Jarašius L. et al. 2022).

Данный метод нашел широкое применение в мире и является хорошим компромиссом между научной точностью и стоимостью работ при реализации Климатических проектов, что в свою очередь, положительно оценивается как потенциальными инвесторами, так и международными реестрами углеродных единиц.

Целью исследования была отработка методики применения данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) для картографирования осушенных торфяников в целях реализации Климатического проекта в соответствии с национальной методологией СРМ0016 (Методология... 2024).

Объектом исследования является участок торфяного месторождения (т/м) Оршинский Мох (Тверская область), в частности юго-западная часть, площадью 740 га.

Общий план работ состоял из следующих этапов:

1. Определены границы участка работ на основе критериев, предъявляемых к Климатическим проектам;

2. Собраны и проанализированы ДЗЗ, в частности:

3. Сверхвысокодетальный мультиспектральный снимок WorldView-2 с разрешением 0,5 м/пикс;

4. Ортофотопланы БПЛА на части участков с разрешением 0,05 м/пикс.

Высокодетальные мультиспектральные разносезонные снимки Sentinel - 2A за 2023 год с разрешением 10 м/пикс.

На основе полученных данных выделены предварительные однородные классы поверхности;

С помощью разработанного ранее подхода (Шахматов и др. 2023) были проведены комплексные полевые исследования;

Каждый класс был отнесен к тому или иному классу GEST, описанному в литературе, в соответствии с зафиксированным набором доминантных видов, трофностью, уровнем УБВ;

Были определены спектральные и текстурные дешифровочные признаки каждого класса GEST;

На основе полученной информации проведено уточненное картографирование классов GEST по состоянию на 2023 год для всего участка исследований;

На основе анализа литературы, идеологии, заложенной в первую очередь в работах

Couwenberg et al. (2011), Jarašius L. et al. (2022) и других, а также на основе специального ретроспективного исследования, были определены возможные переходы классов GEST для Базового и Проектного сценариев Климатического проекта;

На основе разработанной матрицы переходов классов GEST было проведено картографирование прогнозных классов GEST для всей территории и проведен расчет уровня эмиссий как для Базового, так и для Проектного сценариев.

Матрица переходов классов GEST была разработана на основании следующих подходов:

Анализ имеющихся литературных источников для сукцессий растительности на заброшенных и обводненных торфяниках;

Результаты мониторинга процесса вторичного обводнения и изменений биотических и абиотических факторов на мониторинговых площадках, где данные работы реализовывались в период 2014-2019 гг. (участки Орша 1, 2, 4) (Орлов, Шахматов, 2020).

Идеология связности классов GEST, представленная в Методическом руководстве... (Jarašius L. et al. 2022).

Анализ исторических материалов ДЗЗ для участка планируемого проекта.

Анализ имеющихся литературных источников

Нарушенные разработкой торфяники являются интразональными комплексами, поэтому на них применимы знания об изменениях природных комплексов для различных зон. В рамках анализа были рассмотрены работы для Европейской части России и частично Белоруссии.

Результаты мониторинга растительности на территориях, где вторичное обводнение было выполнено в 2014-2019 гг. (Участки Орша 1, 2, 4)

Проект вторичного обводнения был реализован в период 2014-2019 гг. на участках Орша 1, 2, 4, находящихся в пределах той же болотной системы, что и участки климатического проекта. В пределах этих участков было заложено 14 площадок для контроля состояния растительности и УБВ. Результаты мониторинга на этих 14 площадках также легли в основу определения переходов классов земного покрова для проектного сценария.

Идеология связности классов GEST, представленная в Методическом руководстве... (Jarašius L. et al. 2022)

Авторы Методического руководства... (Jarašius L. et al. 2022) провели измерения на 13 нарушенных торфяниках, из 5 различных Восточно-Европейских стран. Как уже упоминалось, торфяники являются интразональными комплек-

сами, поэтому использование классов GEST, а также измерений эмиссий, на них допустимо для торфяников Тверского региона. Всего в рамках Методического руководства... (Jarašius L. et al. 2022) было выделено 29 основных классов GEST и 7 дополнительных. В основе выделения классов GEST лежит классическая идея биогеоиндикации - использование растительных сообществ в качестве индикатора свойств среды, не наблюдаемых напрямую. Каждый из классов GEST характеризуется различными вариантами наборов видов растений, которые являются индикаторами этого класса.

Анализ исторических материалов данных дистанционного зондирования для участка планируемого проекта.

Дополнительно был проведен анализ изменений природных комплексов для зоны проведения климатического проекта (Орлов и др. 2023).

В качестве основных материалов, позволяющих проследить историю развития биогеоценозов, выступали космические снимки. Всего было подобрано 10 сроков наблюдения (1964 – 2021). Было прослежено восстановление растительных сообществ на торфянике с момента окончания активной добычи до настоящего времени.

Участки открытого и слабо задернованные торфа имели наибольшее распространение в 1979 году, и с 1997 года начинается их активное зарастание. Происходит увеличение площади мелколиственных лесов, самое резкое увеличение площади относится к периоду 1997-2001 гг. После 1979 года идет плавный рост площадей тростниковых ассоциаций. В период 1997-2001 гг. также отмечается их резкий рост.

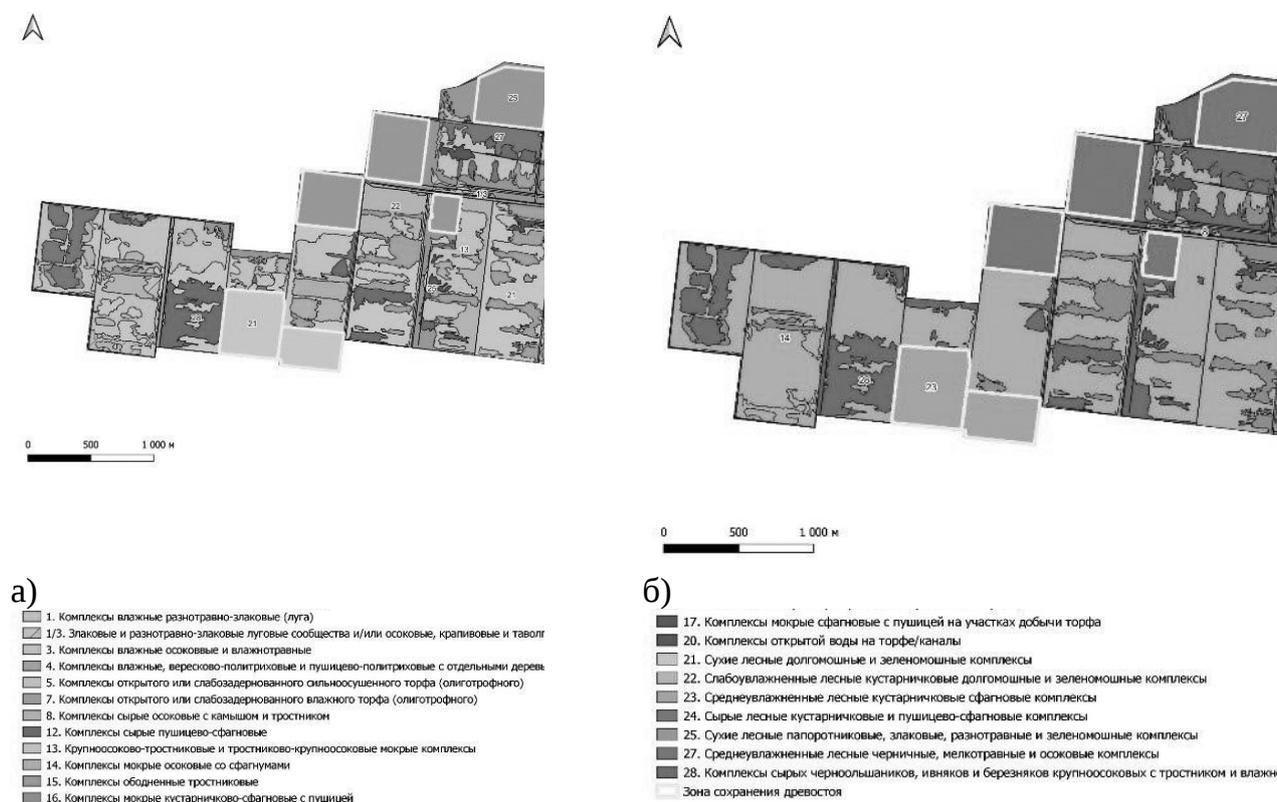
Результатом анализа всех рассмотренных материалов стала матрица переходов. Данная матрица соответствует идеям методологии СРМ0016. Матрица переходов учитывает:

1. Базовый сценарий и, соответственно, изменения, которые могут быть без реализации Климатического проекта (непредсказуемые и разнонаправленные);

2. Проектный сценарий и, соответственно, тенденции увеличения УБВ и общей влажности проектной территории;

По результатам работ по оценке состояния участков планируемого Климатического проекта были построены карты существующих и прогнозных классов GEST в соответствии с различными сценариями (рисунок 1).

На основании построенных карт можно сделать выводы по изменению площадей, занятых тем или иным классом и, соответственно, произвести расчеты изменения эмиссии ПГ на всей территории Климатического проекта.



в) Рисунок 1. Карты классов GEST для Базового (а) и Проектного (б) сценариев, условные обозначения (в)

1. Гордеева Е. М., Фурса Ю.В., Шахматов К.Л. 2023. Вторичное обводнение осушенных торфяников Российской Федерации – это новое направление реализации Климатических проектов с целью снижения выбросов парниковых газов, пожарной опасности и восстановления утраченного уникального биоразнообразия болотных экосистем. Современные тенденции низкоуглеродного развития: глобальные и региональные аспекты. Материалы международной научной конференции / Научные редакторы М.Ш. Минцаев, И.А. Керимов. Грозный: НПП «Геосфера». С.20-27
2. Орлов Т.В., Архипова М.В., Бондарь В.В., Шахматов К.Л. 2023. Формирование и динамика пространственной ландшафтной структуры выработанных торфяников (на примере участка болота Оршинский мох, Тверская область) // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения. Материалы XIV Международной ландшафтной конференции. В 2-х томах. Отв. редакторы А.С. Горбунов, А.В. Хорошев, О.П. Быковская. Воронеж., С.155-158.
3. Орлов Т.В., Шахматов К.Л. 2020. Анализ эффективности работ по вторичному обводнению торфяников Тверской области с помощью данных дистанционного зондирования. ГЕОЭКОЛОГИЯ. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. М.: Наука., №6, с. 74-82
4. Шахматов К.Л., Орлов Т.В., Суворов Г.Г., Чередниченко О.В., Фурса Ю.В., Моченов С.Ю., Архипова М.В., Бондарь В.В., Бахтина И.С., Климов Е.В., Гордеева Е.М. 2023. Апробация методов площадной оценки эмиссии парниковых газов на осушенных торфяниках Северо-Запада России с помощью GEST-подхода (на примере торфяника Дедово поле) // Труды Инсторфа 28 (81). с. 10-20.
5. Методология реализации климатического проекта № 0016 (СРМ0016) «Вторичное обводнение осушенных торфяников умеренного пояса» (Разработчик: Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля; Авторский коллектив: Шахматов К.Л., к.т.н.; Орлов Т.В., к.г.-м.н.; Фурса Ю.В., к.э.н.; Чернова М.Б., к.ю.н.; Суворов Г.Г., к.б.н.), Версия 2.0, Апрель 2024 г.
6. Couwenberg, John & Thiele, Annett & Tanneberger, Franziska & Augustin, Jürgen & Bärish, Susanne & Dubovik, Dimitry & Liashchynskaya, Nadzeya & Michaelis, Dierk & Minke, Merten & Skuratovich, Arkadi & Joosten, Hans. 2011. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. Hydrobiologia. 674. 67-89. 10.1007/s10750-011-0729-x.
7. Jarašius L. et al. 2022. Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore. Lithuanian Fund for Nature, Vilnius, 201 p.

ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭКСПРЕСС КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НАРУШЕННЫХ ЗАБРОШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

APPROACHES TO AUTOMATED EXPRESS CLASSIFICATION OF VEGETATION COVER TYPES OF DISTURBED ABANDONED PEATLANDS IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

Т.В. Орлов^{1}, М.В. Архипова¹, В.В. Бондарь¹*
*T.V.*Orlov¹, M.V. Arkhipova¹, V.V. Bondar¹*

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (г. Москва, Россия)
 *E-mail: tim.orlov@gmail.com

Нарушенные торфяники занимают громадные площади в пределах Европейской части России. В настоящее время, по большей части они заброшены и становятся зоной развития пожаров, а также повышенных эмиссий парниковых газов. Многие исследователи занимались выделением классов растительности нарушенных торфяниках, например (Сирин, 2020).

Целью работы является разработать и апробировать подход автоматизированного разделения типов групп ассоциаций растительности на заброшенных торфяниках.

Были сформулированы требования к разрабатываемому подходу:

Автоматизированное решение, позволяющее для любого торфяника в пределах Европейской части Российской Федерации, получить карту групп ассоциаций растительности нажатием одной кнопки.

Выделение достаточного широкого набора классов, которые индицируют основные процессы, идущие на торфянике. В первую очередь эмиссию парниковых газов, и пожары.

На основе полевых данных (112 описаний, сделанных в Ленинградской области и Псковской области на выработанных торфяниках) были выделены следующие группы растительных ассоциаций в пределах нарушенных торфяников:

1 торфяная пустошь – участки открытого торфа с кочками пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum*), пятнами политрихума (*Politrichum strictum*);

2 пушицево-политриховые сообщества, кустарничково (*Calluna vulgaris*)-политриховые сообщества с пушицей влагалищной с отдельными деревьями (*Betula pendula*, *Pinus sylvestris*) и участками голого торфа;

4 заросли березовые и сосновые пушицево-политриховые, редкотравные, вейниковые с участками голого торфа;

5 леса березовые и осиновые редкотравные, злаковые, зеленомошные;

7 леса сосновые и еловые редкотравные, мелкотравные, зеленомошные

8 тростниковые (*Phragmites australis*) сообщества;

9 осоковые (*Carex* spp) сообщества;

10 осоково-сфагновые и кустарничково-сфагновые сообщества;

11 сосново-кустарничково-сфагновые сообщества;

12 ивовые (*Salix* spp) и березово-ивовые сообщества

13 разнотравно-злаковые луговые сообщества

14 участки открытой воды и сильно обводненные участки. Этот набор классов обладает следующими основными свойствами – он отражает экологическую ситуацию на торфянике и может быть выделен автоматически, без дополнительных эталонов. Также набор подтянут к классам эмиссий парниковых газов, принятых для нарушенных торфяников (Jarašius L. et al., 2022.)

Был разработан комплекс последовательного подбора и обработки космических снимков. Снимки выбирались таким образом, чтобы учесть сезонные процессы и сезонную изменчивость различных фаций.

Наиболее существенными оказались следующие части вегетационных сезонов:

– зима (январь-середина марта),

- весна (середина апреля-середина мая),

- поздняя весна (середина мая- середина июня),

- лето (середина июня-август).

Были использованы снимки Sentinel 2, с пространственным разрешением 10 м, как наиболее подходящие для этой задачи. Они имеют соответствующее частотное покрытие.

Для каждого из этих временных промежутков были рассчитаны:

- максимальное значение NDVI,
- медианное значение EVI.

- Индекс WRI был рассчитан для периода май-июнь.

Таким образом была разработана схема разделения групп растительных ассоциаций (рис. 1).

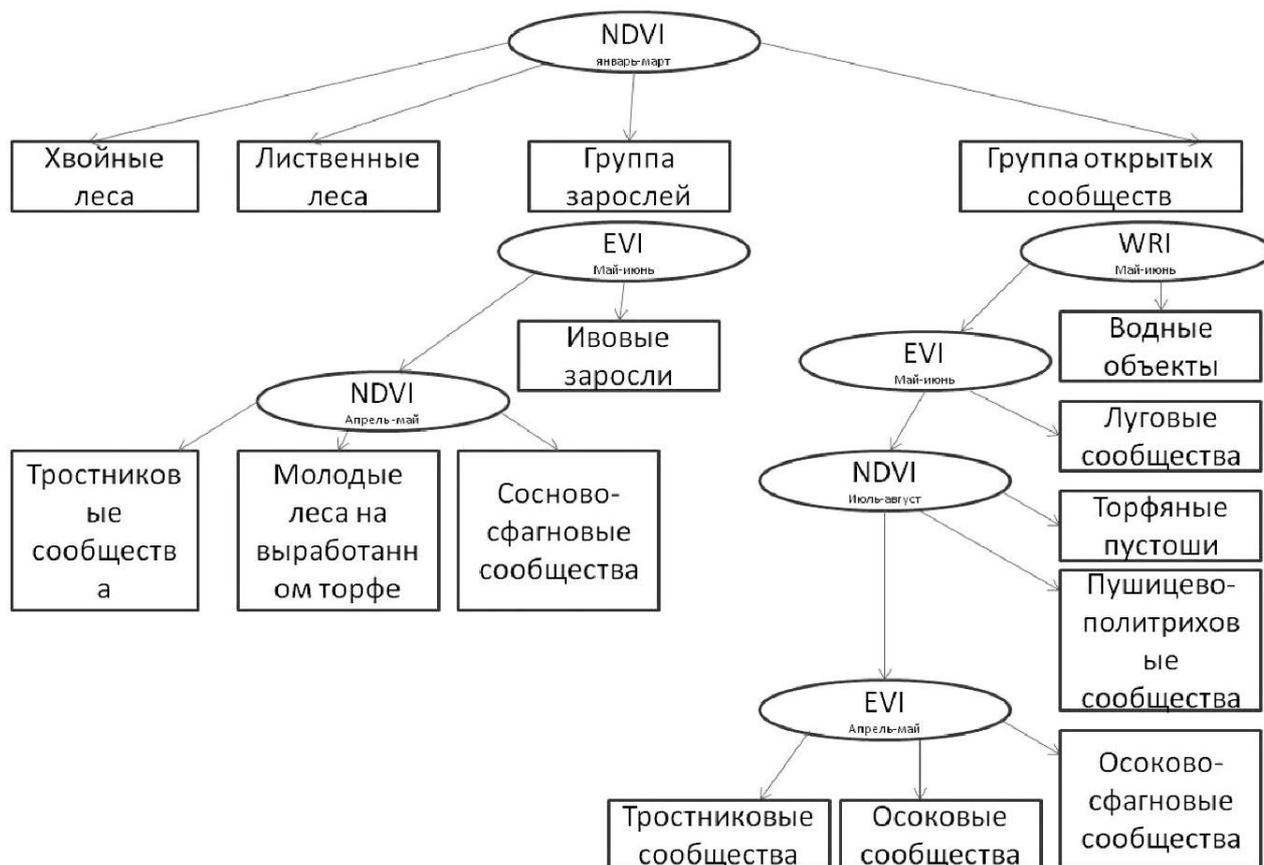


Рисунок 1. Схема работы алгоритма

Разработанный алгоритм (рисунок 1) был реализован с помощью кода на базе Google Earth Engine. Код подразумевает загрузку границ торфяника в ГИС формате. Реализованный код осуществляет подбор съемки по выбранным периодам, расчет индексов, применение заранее установленных порогов и получение финальной карты групп растительных ассоциаций по 14 классам. Работа кода реализована по следующей логике.

На первом шаге по NDVI зимы разделяются следующие группы:

- однозначно выделяются хвойные леса, имеют максимальные значения NDVI в этот период

- однозначно выделяются мелколиственные леса

- выделяется группа зарослей, которая включает – молодые несомкнутые леса, ивовые и ивово-березовые сообщества, сосново-кустарничково-сфагновые сообщества и частично высокие заросли тростника.

- выделяется группа открытых сообщества – торфяные пустоши, пушицево-политриховые, тростниковые, осоковые, сфагновые сообщества и водные и обводненные участки. Эти сообщества в зимний период имеют низкий NDVI, т.к. покрыты снегом.

На следующем этапе разделяются сообщества внутри выделенных групп зарослей и открытых сообществ.

Для открытых сообществ на основе индекса WRI за май и июнь месяцы отделяются водные и переувлажненные участки (14). Данные участки однозначно характеризуются с помощью данного индекса. В конце мая начале июня максимальной «зелености» достигают луговые сообщества (13). Они довольно однозначно отделяются по индексу EVI за этот период.

В середине лета, когда растительность достигла максимальной «зелености» отделяются помощью NDVI редкотравные сообщества, где значительные площади заняты голым торфом. (1 и 2). Финально для группы открытых сообществ

ществ разделяются тростниковые (8), осоковые (9) и осоково-кустарничково-сфагновые (10) сообщества. Это можно сделать на основе снимков конца апреля – первой половины мая, когда болотные сообщества с большой долей сфагнума уже достаточно зеленые за счет мхов и вечнозеленых кустарничков, а осоковые и тростниковые сообщества еще не начинали вегетировать. По значению EVI однозначно отделяются осоково-кустарничково-сфагновые сообщества. Условно можно разделить осоковые и тростниковые сообщества, считая, что EVI осоковых сообществ выше, чем EVI тростниковых сообществ. Далее аналогично разделяются группа зарослей. В мае-июне максимальные значения EVI характерны

для ивовых и ивово-березовых зарослей (12). Далее на основе NDVI апреля-мая однозначно отделяются высокие тростниковые заросли (8), которые в этот момент имеют низкий NDVI. Условно можно разделить молодые леса (береза, сосна) пушицево-политриховые, редкотравные, вейниковые с участками голого торфа (4) и сосново-кустарничково-сфагновые (11) сообщества. Вторые в этот период имеют больший NDVI.

Метод был апробирован на торфяниках Ленинградской, Вологодской, Псковской, Новгородской областей.

В результате работы алгоритма были построены карты для нескольких торфяников (рис. 2).

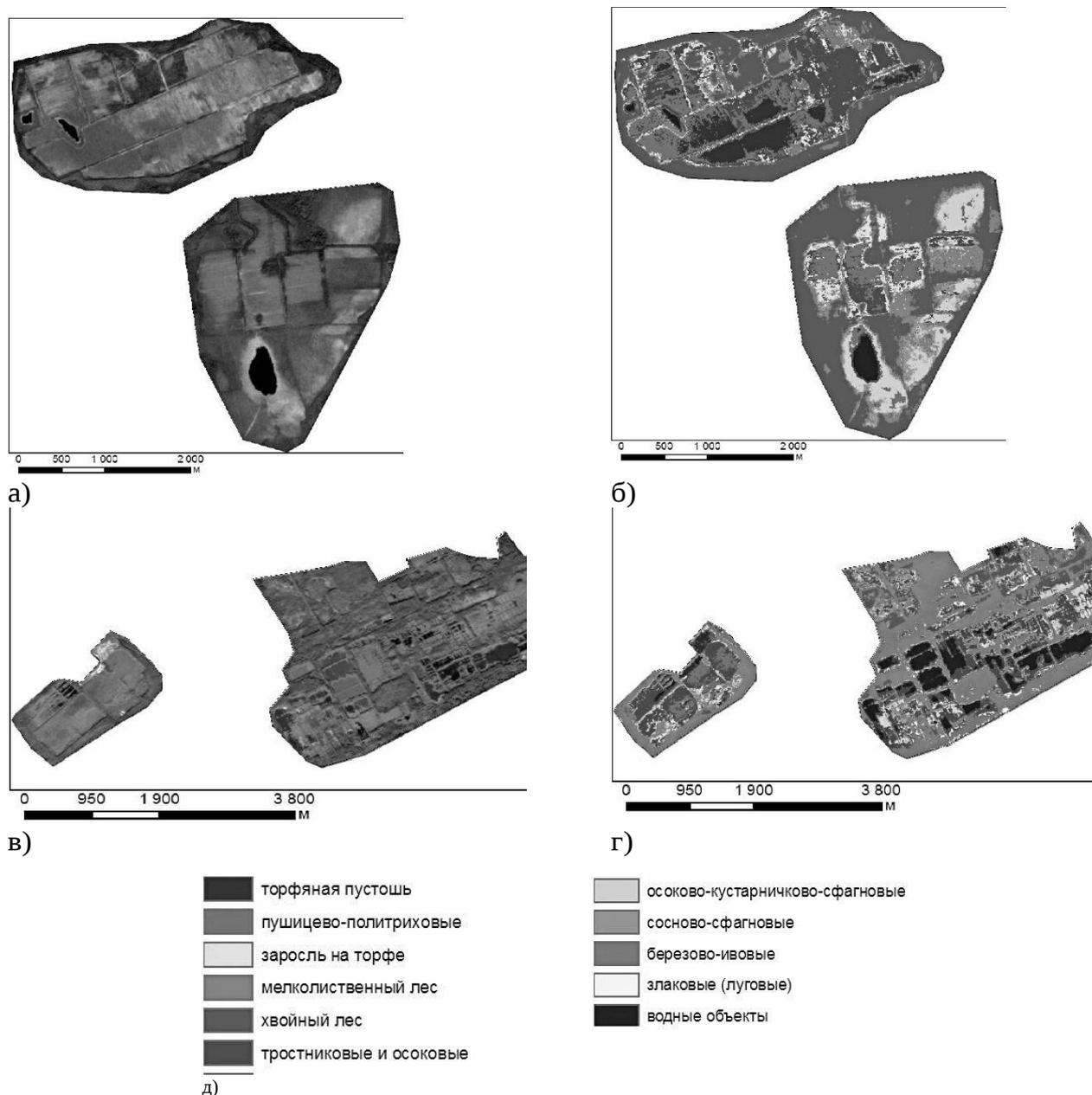


Рисунок 2. Примеры построенных карт для торфяников: ААА а) космический снимок, б) результат классификации, БББ в) космический снимок, г) результат классификации, д) условные обозначения

Была оценена точность разработанного бок и индекс К - Каппа Коэна. Достоверность со-
метода на основе полевых точек и матрицы оши- ставила от 0,7 до 0,79.

- 1.Сирин А.А., Медведева М.А., Макаров Д.А., Маслов А.А., Юстен Х. 2020. Мониторинг растительного покрова вторично обводненных торфяников Московской области, // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. №2.
- 2.Jarašius L. et al. 2022. Handbook for assessment of greenhouse gas emissions from peatlands. Applications of direct and indirect methods by LIFE Peat Restore. Lithuanian Fund for Nature, Vilnius, 201 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ТИПОВ БОЛОТ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

MAPPING PROSPECTS OF DIFFERENT TYPES OF SWAMPS USING REMOTE SENSING DATA

*С.С. Шинкаренко¹, Е.А. Дюкарев², С.А. Барталев¹, Е.А. Головацкая²
S.S. Shinkarenko¹, E.A. Dyukarev², S.A. Bartalev¹, E.A. Golovatskaya²*

¹ Институт космических исследований РАН, (г. Москва, Россия)

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия)

e-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

Болота занимают до 5% площади суши, при этом в них сосредоточено до 1/3 всего органического углерода (Вомперский, 2005). В России крупнейшие болотные комплексы сосредоточены в Западной Сибири, где их площадь достигает 1 млн кв. км. Климатические изменения последних десятилетий приводят с одной стороны к заболачиванию вследствие деградации многолетней мерзлоты, с другой стороны из-за осушения торфяников интенсифицируются ландшафтные пожары. Эти процессы приводят к изменениям баланса углерода в болотах, которые сложно оценить из-за отсутствия достоверных данных о площадях болот разных типов, обусловленного труднодоступностью болот.

Наличие регулярно обновляемых однородных многолетних рядов данных дистанционного зондирования Земли из космоса предоставляет возможности для объективного изучения изменений площадей различных болотных экосистем (Шинкаренко, Барталев, 2023; Dyukarev et al., 2017). Существующие карты наземных экосистем России включают только две категории водно-болотных угодий: болота и прибрежную растительности (Барталев и др., 2016), в то время как согласно Рамсарской конвенции в России представлены десятки типов водно-болотных угодий

(Кривенко, Виноградов, 2000). В связи с этим возникает актуальная проблема разработки типологии болотных экосистем, которая с одной стороны обеспечивала бы более высокий уровень тематической детальности для целей оценки бюджета углерода, а с другой стороны – была бы достаточно генерализованной для применения на территории России (Терентьева и др., 2020). Традиционно болотные экосистемы разделяют на три типа по характеру питания: эвтрофные, мезотрофные и олиготрофные (Иванов, 1957). В свою очередь каждый из этих типов может быть разделен в зависимости от свойств растительного покрова, например, наличия древесного яруса и его состава. Также выделяются комплексы мочажин и гряд или рямов. На основе классификаций болот, используемых в Западной Сибири (Иванов, 1957; Романова и др., 1977; Сирин и др., 2014; Усова, 2009; Terent'eva et al., 2017), была разработана типология болот, отвечающая требованиям достаточной тематической детальности при умеренном уровне генерализации (таблица). Далее методом экспертного дешифрирования спутниковых данных Sentinel-2 и высокодетальных спутниковых изображений из открытых источников была сформирована опорная выборка для более 1,5 тысяч полигонов общей площадью более

Таблица. Типы болотных экосистем, включенные в классификацию

N	Тип	Стадия	Группа	Площадь, %
1	Сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям)	Олиготрофная	Древесная	20
2	Рямово-мочажинный комплекс	Олиготрофная	Древесная	15
3	Грядово-мочажинный комплекс	Олиготрофная	Древесно-травяная	40
4	Травяно-сфагновая топь	Олиготрофная, мезотрофная	Травяная	8
5	Древесное кустарничково-мохово-разнотравное болото (согра)	Эвтрофная	Древесная	10
6	Осоково-гипновое болото	Эвтрофная	Травяная	5
7	Озера			2

400 тыс. га на территорию Томской области. При этом кроме собственно указанных в таблице типов болот в опорную выборку были включены также и отличные от болот классы, такие как темнохвойные вечнозеленые леса, светлохвойные вечнозеленые леса, лиственные леса, смешанные леса, лиственные кустарники, луга, прибрежная растительность, пахотные земли.

В основе использованного метода картографирования типов болотных экосистем лежит использование ежедневных данных MODIS пространственного разрешения 230 м с устраненным влиянием облачного покрова (Миклашевич и др., 2019), разработанные в ИКИ РАН и доступные пользователям ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Использовались данные за вегетационный сезон 2022 года. Классификация болотных экосистем по данным ДЗЗ основывалась на использовании непараметрического алгоритма машинного обучения «случайный лес». В качестве признаков распознавания на вход алгоритма подавались значения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в красном и инфракрасном спектральных диапазонах, полученные в различные временные интервалы вегетационного сезона, а также в зимний

период при наличии снежного покрова на земной поверхности. Уменьшение интервала между датами использованных спутниковых данных, а следовательно, и рост количества признаков распознавания, не дало существенного роста точности, но приводит к значительному увеличению времени обучения алгоритма. Оптимальным оказалось использование 3-5 дневных интервалов спутниковых наблюдений, что обеспечило общую точность распознавания на уровне 95% при существенно меньших вычислительных затратах по сравнению с использованием ежедневных данных.

Полученные результаты картографирования болотных экосистем южно- и среднетаежной подзон Западной Сибири на основе опорной выборки, полученной методом экспертного дешифрирования, спутниковых изображений MODIS с устраненным влиянием облачности и методов машинного обучения, характеризуются высокой точностью и могут быть применены на значительно большей территории. Основными ограничивающими факторами являются необходимость дальнейшего совершенствования типологии болот и организации работ по сбору опорной информации на уровне страны.

Исследование выполнено в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2022-1229 (13.2251.21.0179) «Применение технологий высокопроизводительных вычислений и больших данных для совместной разработки экономически эффективных автоматизированных методов широкомасштабного биомониторинга водно-болотных угодий. HPC and BigData applied to co-designing cost-efficient automation for large scale wetland biomonitoring».

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Известия РАН. Сер. географическая. 2005. № 5. С. 39–50.
3. Иванов К.Е. Основы гидрологии болот лесной зоны. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 500 с.
4. Кривенко В.Г., Виноградов В.Г. Водно-болотные угодья России // Wetlands International Global Series. 2000. Т. 3. С. 11–21.
5. Романова Е.А., Быбина Р.Т., Голицина Е.Ф., Иванова Г.М., Усова Л.И., Трушников Л.Г. Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины. Л.: ГУГК, 1977. 500 с.
6. Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Плотников Д.Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143-154. DOI 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
7. Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О.П., Глухова Т.В. Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65-71.
8. Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В., Курбатова Ю.А., Максютов Ш.Ш. Картографирование таежных болот Западной Сибири на основе дистанционной информации // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 920-930 DOI 10.31857/S2587556620060102.
9. Усова Л.И. Практическое пособие по ландшафтному дешифрированию аэрофотоснимков различных типов болот Западной Сибири. – СПб.: Нестор-История, 2009. – 80 с.
10. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Применение данных дистанционного зондирования для широкомасштабного мониторинга водно-болотных угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 9-34 DOI: DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-9-34
11. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Богодухов М.А., Ворушилов И.И., Сайгин И.А. Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанционного зондирования и гидрологической ин-

формации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 119-135 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135.

12. Dyukarev E.A., Alekseeva M.N., Golovatskaya E.A. Study of Wetland Ecosystem Vegetation Using Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. P. 1029–1041. DOI:10.1134/S0001433817090092.
13. Terent'eva I.E., Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Smolentsev B.A., Maksyutov S.S. A new map of wetlands in the southern taiga of the West Siberia for assessing the emission of methane and carbon dioxide // *Water Resources*. 2017. V. 44. No. 2. P. 297-307. DOI 10.1134/S0097807817020154.

СОДЕРЖАНИЕ

Plenary report
Пленарные доклады

Д.Г. Груммо, Н.А. Зеленкевич, Е.В. Мойсейчик, А.В. Козулин, М.В. Максименков
ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛОТ БЕЛАРУСИ И ПЛАН
ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ НА ПЕРИОД ДО 2040 ГОДА..... 7

В.Н. Коротков, А.А. Трунов, А.В. Исаева, М.А. Медведева
ТОРФЯНИКИ В НАЦИОНАЛЬНОМ КАДАСТРЕ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ 11

*Е.Д. Лапшина, Е.А. Дюкарев, Е.А. Заров, А.Ф. Сабреков, Ю.В. Куприянова, Д.В. Ильясов,
А.В. Ниязова, А.А., Филиппова Н.В*
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПОЛЕВОЙ СТАЦИОНАР МУХРИНО – ПОЛИГОН ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 13

А.В. Ольчев
СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: РОЛЬ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ СМЯГЧЕНИЯ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ 16

**Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed mire
ecosystems. Biogeochemistry of peats and mire waters
Greenhouse gas emissions**

**Биогеохимические циклы естественных и антропогенно-нарушенных
болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод.
Эмиссия парниковых газов**

B.D. Belan, D.K. Davydov, E.A. Dyukarev, A.A. Plotnikov, A.V. Fofonov
STUDYING FOR GREENHOUSE GAS FLUXES FROM THE WETLAND ECOSYSTEMS BY
APPLICATION OF AUTOMATED METHODS 19

Е.Н. Гуляева, Е.В. Линкевич, В.М. Прокопюк, Л.А. Ефимова
ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА С МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМИ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ
НА ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ 20

Е.А. Дюкарев, А.А. Дмитриченко, Е.А. Заров, А.А. Кулик, Е.Д. Лапшина
РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ЧИСТЫМ ЭКОСИСТЕМНЫМ ОБМЕНОМ БОЛОТ
НА ПОЛЕВОМ СТАЦИОНАРЕ МУХРИНО В 2022-2023 ГГ. 24

А. Т. Загидуллина, Н.В. Динкелакер, Н.В. Глушкова, Ю.А. Паутов
ОЦЕНКА ПУЛОВ УГЛЕРОДА ПЕРВИЧНЫХ ЛЕСОВ ДВИНО-МЕЗЕНСКОЙ ЛАНДШАФТНОЙ
ПРОВИНЦИИ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ 27

С.В. Загирова, М.Н. Мигловец
ОЦЕНКА ЭКОСИСТЕМНЫХ ПОТОКОВ СО₂ НА КРУПНОБУГРИСТОМ БОЛОТЕ
КРАЙНЕ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ..... 28

Д.Г. Иванов, Ю.А. Курбатова
ВЕРХОВОЕ БОЛОТО «СТАРОСЕЛЬСКИЙ МОХ» КАК ОБЪЕКТ МНОГОЛЕТНИХ
СТАЦИОНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАЗООБМЕНА СО₂ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РФ:
ОПЫТ ОРГАНИЗАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ 31

<i>Е. Н. Икконен, Н. Е. Гарсиа-Кальдерон, Э. Фуентес-Ромеро, А. Ибаньес-Хуэрта</i> ПОТОКИ УГЛЕРОДА В ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ МЕКСИКИ	33
<i>А.А. Кулик, Е.А. Заров, А.А. Дмитриченко, Е.А. Дюкарев</i> ДОЛГОСРОЧНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ПОТОКА УГЛЕРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ	35
<i>С.Ю. Моченов, Д.В. Ильясов, Г.Г.Суворов, М.С.Мишина, Р.А.Руньков, М.В. Глаголев</i> ЗАБОЛОЧЕННЫЕ ЛЕСА ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ КАК ИСТОЧНИКИ МЕТАНА	39
<i>П.А. Рязанцев, С.А. Кутенков</i> ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ СВОБОДНОЙ ФАЗЫ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ТОРФЕ БУГРИСТЫХ БОЛОТ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА	43
<i>Е.М. Сатосина, Д.Ю. Гущина, М.А. Тарасова, Р.Р. Гибадуллин, И.В. Железнова, Е.Р. Емельянова, А.М. Осипов, А.В. Ольчев</i> ВЛИЯНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР И ОСАДКОВ НА ПОТОКИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И СКРЫТОГО ТЕПЛА В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ	47
<i>А.С. Третьякова, А.А. Кочубей, В.А. Лебедев, Н.Ю. Груданов, Д.К. Диярова, С.А. Сенатов, Д.А. Филиппов</i> ФЛОРА, ПАРАМЕТРЫ ДРЕВОСТОЯ И ГАЗООБМЕН НИЗИННОГО ЛЕСНОГО БОЛОТА (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА ПАКЛИНСКОЕ, СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)	49

**Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed mire
ecosystems. Biogeochemistry of peats and mire waters
Carbon balance and carbon cycle modeling**

**Биогеохимические циклы естественных и антропогенно-нарушенных
болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод.
Углеродный баланс и моделирование углеродного цикла**

<i>Shugang Wu</i> A PRELIMINARY STUDY OF TRACING METHANE SOURCES USING CARBON ISOTOPES IN XI'AN, CHINA.....	53
<i>Xiaotong Tang, Zhengkun Fang, Jiaxing Zhou, Bixi Zhao, Tongyu Fan, Chuanlun Zhang, Yu Xia, Yanhong Zheng</i> CHANGING MICROBIOME COMMUNITY STRUCTURE AND FUNCTIONAL POTENTIAL DURING PERMAFROST THAWING ON THE TIBETAN PLATEAU	54
<i>А.А. Алавердова, Е.М. Гоконова, Т.Ю. Минаева, Л.Ю. Макарова, К.Л. Шахматов</i> ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБВОДНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИЗИННОГО БОЛОТА УМЕРЕННОЙ ЗОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MIKE SHE	55
<i>Л.Л. Голубятников, Е.А. Заров</i> ТУНДРОВЫЕ ОЗЁРА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ПОТОКИ МЕТАНА, СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ	58
<i>Н.Н. Завалишин, Л.Л. Голубятников, Г.Г. Александров</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА БОЛОТ ТУНДРОВОЙ И ЛЕСОТУНДРОВОЙ ЗОНЫ РОССИИ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА.....	60

<i>А.В. Ларина, Л.А. Кривенок, В.С. Казанцев</i> ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ И ЮЖНОТУНДРОВОЙ ЗОН ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....	62
<i>Ю.В. Мухартова, А.В. Ольчев, А.Ф. Согачев, Ю.А. Курбатова, В.М. Степаненко</i> ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ CO ₂ НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА «СТАРОСЕЛЬСКИЙ МОХ»	65
<i>А. А. Рязанова, В. Ю. Богомолов, З. Е. А. Дюкарев</i> ОЦЕНКА ПОТОКОВ МЕТАНА С БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МОДЕЛИ TERM.....	67
<i>А.Ф. Сабреков, М.В. Семенов, И.Е. Терентьева, М.В. Глаголев, Ю.В. Литти</i> АНАЭРОБНОЕ ОКИСЛЕНИЕ И АЦЕТОКЛАСТИЧЕСКИЙ МЕТАНОГЕНЕЗ – КЛЮЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ ЦИКЛА МЕТАНА В ГЛУБИННЫХ СЛОЯХ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ	70
 Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed mire ecosystems. Biogeochemistry of peats and mire waters Dynamics and carbon stocks in mire ecosystems Биогеохимические циклы естественных и антропогенно-нарушенных болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод. Динамика накопления и запасы углерода в болотных экосистемах 	
<i>С.Э.Вомперский, А.А. Сирин, Т.В. Глухова, О.П. Цыганова, Н.А. Валяева</i> ЗАПАС УГЛЕРОДА В ТОРФАХ БОЛОТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (НОВЫЙ ПОДХОД)	75
<i>Е.Э. Веретенникова, Г.В. Симонова, И.В. Курьина</i> НАКОПЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ГОЛОЦЕНЕ НА ПРИМЕРЕ ОМБРОТРОФНОГО ТОРФЯНИКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ).....	78
<i>Е.М. Волкова, А.В. Головченко, О.А. Леонова</i> АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА И ЗАПАСЫ МИКРОБНОЙ БИОМАССЫ В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ ПОЙМЕННЫХ БОЛОТ СЕВЕРО-ВОСТОКА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ	81
<i>А.А. Егоров, Т.В. Глухова, А.А. Широковская</i> ДИНАМИКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ДРЕВОСТОЕ СОСНЯКА АНДРОМЕДО-ПУЩИЦЕВО-СФАГНОВОГО ЗА 50 ЛЕТ ПРИ ЭКСТЕНСИВНОМ ОСУШЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОДТАЙГИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ (ЗАПАДНОДВИНСКИЙ ЛЕСОБОЛОТНЫЙ СТАЦИОНАР)	84
<i>Т. А. Копотева</i> БИОТИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ ПИРОГЕННО НАРУШЕННЫХ МЕЗОТРОФНЫХ КУСТАРНИЧКОВО-СФАГНОВЫХ БОЛОТ ПРИАМУРЬЯ	85
<i>Ю.В. Куприянова, Е.Д. Лапшина, А.Ф. Сабреков, А.В. Ниязова, Е.А. Заров, Д.В. Ильясов, Н.В. Филиппова, А.А. Каверин, О.Л. Кузнецов, С.А. Кутенков, В.Л. Миронов, Н.Г. Коронатова, Е.К. Вишнякова, Е.А. Головацкая, Е.Э. Веретенникова, Г.Г. Суворов, Т.В. Глухова</i> ПРЕДПОСЫЛКИ И СЛОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ ЕДИНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ИЗУЧЕНИЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО-НАРУШЕННЫХ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ.....	88
<i>С.А. Кутенков, О.Л. Кузнецов, Л.В. Канцерова, В.Л. Миронов, П.А. Игнашов, Е.Л. Талбонен, В.С. Васюта</i> ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ БОЛОТНОЙ СИСТЕМЫ «КОЙВИЛАМБИСУО» (ЮЖНАЯ КАРЕЛИЯ).....	92

<i>О.А. Леонова, Е.М. Волкова, Д.В. Зацаринная</i> СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ ВОДОРАЗДЕЛЬНЫХ БОЛОТ СЕВЕРА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ	94
<i>Е.А. Макарова, Н.Г. Мазей, А.Е. Шатунов, А.С. Прокушкин, Е.Ю. Новенко</i> ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА БОЛОТНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ МОРДОВСКОГО ЗАПОВЕДНИКА	97
<i>Ю.И. Прейс, Е.А. Головацкая., М.М. Кабанов</i> МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ	101
<i>П.С. Широких, Н.И. Федоров, И.Г. Бикбаев, С.Н. Жигунова, Э.З. Баишева, И.Р. Туктамышев</i> ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНОГО ОБВОДНЕНИЯ НА ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В РАСТИТЕЛЬНОСТИ БОЛОТНОГО КОМПЛЕКСА «БЕРКАЗАН-КАМЫШ»	104

**Biogeochemical cycles of natural and anthropogenically disturbed
mire ecosystems. Biogeochemistry of peats and mire waters
Hydrology and ecology of mires. Biogeochemistry of peats and mire waters
Биогеохимические циклы естественных и антропогенно-нарушенных
болотных экосистем. Биогеохимия торфов и болотных вод.
Гидрология и экология болот. Биогеохимия торфов и болотных вод**

<i>Yukun Fan, Hong Yan, Haiyan Zhao, Xiaolin Hou</i> MARINE-LAND IODINE TRANSPORT INDICATED FROM 14 KYR IODINE RECORD IN PEAT CORE FROM CENTRAL CHINA	107
<i>Н.Н. Воропай</i> ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ БОЛОТ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ	109
<i>Е.А. Головацкая, Л.Г. Никонова</i> БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА РАСТЕНИЙ- ТОРФООБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РАЗЛОЖЕНИЯ	110
<i>А.А. Гринько, О.Г. Савичев, Т.В. Чешкова, Е.В. Гершелис, Ю.А. Моисеева</i> ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ТОРФЯНИКОВ ОБСКОГО НИЗИННОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ).....	113
<i>И.Н.Зубов, А.В. Вельямидова, Е.С. Колпакова, С.Б. Селянина</i> СТОЙКИЕ ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ В ТОРФАХ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ	117
<i>П.А. Игнашов, П.А. Рязанцев, С.А. Кутенков</i> ИЗУЧЕНИЕ ФЕНОМЕНА УСТОЙЧИВОСТИ БУГРИСТОГО БОЛОТА НА МОНЧЕГОРСКОЙ ТЕХНОГЕННОЙ ПУСТОШИ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ).....	119
<i>И.Л. Калюжный</i> НЕЗАМЕРЗАЮЩАЯ ВЛАГА В СЕЗОННО-ПРОМЕРЗАЮЩИХ БОЛОТАХ СЕВЕРА.....	122
<i>Л. В. Карпенко</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПИРОГЕННЫХ ПРОСЛОЙКАХ И ВЫШЕЛЕЖАЩИХ СЛОЯХ ТОРФА ВЕРХОВОГО БОЛОТА, ПРОЙДЕННОГО ПОЖАРАМИ.....	126

<i>В.Н. Колотыгина, Е.А. Солдатова, А.О. Константинов, А.О. Курасова, Е.С. Плотникова</i> СОДЕРЖАНИЕ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АЗОТА В ПОЧВАХ АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ ТАРМАНСКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА.....	130
<i>Л.В. Литвинов</i> ОСОБЕННОСТИ ИОННОГО СОСТАВА БОЛОТНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ.....	131
<i>Е.А. Лобанова, С.А. Ефимова, Е.В. Порохина</i> АКТИВНОСТЬ ОКСИДОРЕДУКТАЗ В ВЫРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ.....	134
<i>А.Е. Мальцев, Г.А. Леонова, Ю.И. Прейс, А.А. Ломова</i> ГЕОХИМИЯ БОЛОТНЫХ ВОД ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО-НАРУШЕННЫХ РЯМОВ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НОВОСИБИРСКАЯ ОБЛАСТЬ).....	136
<i>А.П. Морозов, Ю.П. Москвин</i> ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНО-ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА БОЛОТ ЗОНЫ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В СВЯЗИ С ПОТЕПЛЕНИЕМ КЛИМАТА.....	138
<i>Л.Г. Никонова, Е.А. Головацкая</i> ДЕСТРУКЦИЯ <i>SPHAGNUM FUSCUM</i> НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ РАЗЛОЖЕНИЯ В ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ОСУШЕНИЮ И ПИРОГЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ	140
<i>Е.Н. Патова, М.Д. Сивков, Н.Н. Гончарова</i> РОЛЬ АССОЦИАЦИЙ СФАГНОВЫХ МХОВ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ В АККУМУЛЯЦИИ АЗОТА ЗА ПЕРИОД ФОРМИРОВАНИЯ ПОЙМЕННОГО БОЛОТА (БАСЕЙН Р. СЫСОЛА, РЕСПУБЛИКА КОМИ).....	144
<i>Т.В. Скороспехова, А.Д. Журавлева</i> ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА	146
<i>Е.А. Солдатова, А.О. Константинов, А.О. Курасова</i> ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ТАРМАНСКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА.....	149
<i>В.Н. Тюрин, В.А. Харбака, О.В. Масловская</i> РАЗНОГОДИЧНАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ БОЛОТНЫХ ВОД НА УЧАСТКЕ СОЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЕРХОВОГО БОЛОТА (ВОСТОЧНО-СУРГУТСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ НЕФТИ, СУРГУТСКАЯ НИЗИНА)	153
<i>Ю.А. Харанжевская, А.А. Синюткина</i> ОЦЕНКА ТРАНСФОРМАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПИРОГЕННОГО ФАКТОРА.....	155
<i>В.С. Шанёва</i> ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА (МУХРИНО, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ).....	158
<i>О.А. Шапченко, Л.В. Карпенко</i> ВЛИЯНИЕ ПАЛЕОПОЖАРА НА ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ГОЛОЦЕНОВОГО ТОРФЯНИКА В ДОЛИНЕ Р. ДУБЧЕС	160

Biodiversity, typology and protection of mires Биоразнообразие, типология и охрана болот

<i>Н. А. Билая, Д. Д. Карсонова, В. В. Нешатаев, Т. В. Дьячкова, А. М. Лапина</i> МЕСТООБИТАНИЯ МЕЛКОБУГРИСТО-ТОПЯНЫХ БОЛОТ (RUBO SCHARMAEMORI-DICRANOSCHORIETEA ELONGATI): ЭДАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И РЕСУРСНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ	165
<i>К.А. Брагина, Л.А. Курбанова, Р.Ш. Фатхутдинова</i> БОЛОТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В СИСТЕМЕ ООПТ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН.....	167
<i>А.Л. Васина</i> СОСУДИСТЫЕ РАСТЕНИЯ БОЛОТ БАССЕЙНА РЕКИ МАЛАЯ СОСЬВА	168
<i>С.Э. Вомперский, Т.В. Глухова, Н.А. Валяева, А.В. Головченко</i> ПОСТПИРОГЕННОЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ ДРЕВОСТОЯ В ОСУШЕННЫХ СОСНЯКАХ КУСТАРНИЧКОВО-СФАГНОВЫХ	170
<i>С.И. Грабовик, Л.В. Канцерова</i> ДИНАМИКА ВИДОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОСУШЕННОМ БОЛОТЕ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ КАРЕЛИИ.....	173
<i>Ю.Ю. Давыдова, П.Н. Тютяева, А.Н. Неретина, Е.Д. Варакина</i> ОСОБЕННОСТИ ВИДОВОГО СОСТАВА ВЕТВИСТОУСЫХ РАКООБРАЗНЫХ (CRUSTACEA: CLADOCERA) СФАГНОВЫХ БОЛОТ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ	175
<i>К.П. Егоров, М.А. Медведева, О.В. Галанина</i> ИЗМЕНЕНИЕ ОБЛЕСЕННОСТИ МИКРОЛАНДШАФТОВ БОЛОТНЫХ МАССИВОВ ЗАПАДНОДВИНСКОГО ЛЕСОБОЛОТНОГО СТАЦИОНАРА	178
<i>Д.В. Зацаринная, М.В. Лыкова, С.А. Стренина, И.А. Альбекова</i> РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ HCO_3^- И Ca^{2+} НА РОСТ СФАГНОВЫХ МХОВ IN VITRO.....	181
<i>Л.В. Канцерова, П. А. Игнашов</i> РАЗНООБРАЗИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ НА ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ МАЛЫХ БОЛОТАХ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ КАРЕЛИИ.....	184
<i>Е.М. Копцева</i> СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ МЕРЗЛОГО КРУПНОБУГРИСТОГО БОЛОТНОГО КОМПЛЕКСА НА СЕВЕРЕ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ.....	186
<i>В. А. Купцова</i> ДИНАМИКА ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА И ПРОДУКЦИИ СФАГНОВЫХ МХОВ НА МЕЗОТРОФНЫХ БОЛОТАХ ПРИАМУРЬЯ	188
<i>И.А. Лавриненко, О.В. Лавриненко</i> КАТАЛОГ МЕСТООБИТАНИЙ БОЛОТ ВОСТОЧНОЕВРОПЕЙСКИХ ТУНДР	192
<i>М.Е. Леготин, О.В. Галанина</i> ПАЛЕОСООБЩЕСТВА БОЛОТА КАНАВНОЕ НА КАРЕЛЬСКОМ ПЕРЕШЕЙКЕ	194
<i>О.В. Морозова</i> КЛАСС ALNETEA GLUTINOSAE – ЛЕСА НА НИЗИННЫХ БОЛОТАХ ЕВРОПЫ И АЗИИ.....	198

<i>А.А. Мулдашев, М.К. Ишбулатов, П.С. Широких, В.Б. Мартыненко, Э.З. Баишева, И.Г. Бикбаев</i> О РЕДКИХ ВИДАХ СОСУДИСТЫХ РАСТЕНИЙ НА БОЛОТАХ БАШКИРСКОГО ЗАУРАЛЬЯ	201
<i>М.С. Парамонов, А.Н. Цыганов, О.В. Чередниченко, В.Э. Федосов, А.В. Шкурко, Т.Ю. Минаева, Е.А. Шуйская, Н.Г. Мазей, Ю.А. Мазей</i> ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВ РАКОВИННЫХ АМЁБ И РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ПРИМЕРЕ БОЛОТНОГО МАССИВА СТАРОСЕЛЬСКИЙ МОХ (ВАЛДАЙСКАЯ ВОЗВЫШЕННОСТЬ)	203
<i>М.А. Пупышева, Т.А. Бляхарчук</i> ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ	206
<i>О.С. Смирнова, Е.В. Мойсейчик, Н.А. Зеленкевич</i> ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАЗОВОМ КОШЕНИИ ТРОСТНИКА И УДАЛЕНИИ ДРЕВЕСНО-КУСТАРНИКОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ НИЗИННОГО БОЛОТА (ЗАКАЗАНИК «ЗВАНЕЦ», БЕЛАРУСЬ)	208
<i>Н.В. Филиппова, Е.А. Звягина, Т.Ф. Ишманов, И.В. Филиппов</i> СООБЩЕСТВО ГРИБОВ ВЕРХОВЫХ БОЛОТ: ОТ КЛАССИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ К АНАЛИЗУ ТОТАЛЬНОЙ ДНК	211
<i>А.О. Фирстов</i> РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАССЕЙНА БОЛОТА БЕРКАЗАН-КАМЫШ	214
<i>А.Д. Шангина, Т.Ю. Минаева, О.В. Чередниченко</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ	216
<i>Е.А. Шишконокова</i> ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЯДА РЕДКИХ И ОХРАНЯЕМЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ ОЛИГОТРОФНЫХ И МЕЗОТРОФНЫХ БОЛОТ В ПРЕДЕЛАХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХМАО-ЮГРЫ	218
<i>Э.Р. Юмагулова, А.В. Стасив, Г.С. Зайнетдинова, Т.Д. Платыч, Р.Н. Юмагулов</i> АНАТОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИСТЬЕВ ВЕЧНОЗЕЛЕННЫХ КУСТАРНИЧКОВ СФАГНОВЫХ БОЛОТ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООВОГО ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА	220

Paleoecology and history of the development of mire ecosystems **Палеоэкология и история развития болот**

<i>Gu Xiuyuan, Andrey N. Tsyganov, Natalia G. Mazei, Kirill V. Babeshko, Alexander A. Komarov, Yuri A. Mazei</i> TESTATE AMOEBA-BASED RECONSTRUCTION OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF TWO MIRES IN YENISEI SIBERIA	223
<i>Haiyan Zhao, Weijian Zhou, Peng Cheng, Hua Du</i> HOLOCENE CARBON DYNAMICS OF PEATLANDS IN NORTHWESTERN CHINA	225
<i>Т.Г. Антипина, С. Райнхольд, А.Т. Галимов, Н.М. Чаиркина</i> РЕКОНСТРУКЦИЯ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ДРЕВНЕГО ЧЕЛОВЕКА В СРЕДНЕМ ЗАУРАЛЬЕ В ГОЛОЦЕНЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПАЛЕОБОТАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА VI РАЗРЕЗА ГОРБУНОВСКОГО ТОРФЯНИКА	226

<i>В. Р. Батршина</i> СРАВНЕНИЕ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БОТАНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОРФА.....	229
<i>Д.М. Витусик, Е.Н. Крицкая, Е.В. Порохина</i> К ИСТОРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ОХРАНЯЕМОГО ФОНДА БОЛОТ В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ.....	233
<i>А.В. Гренадерова</i> ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ БОЛОТ В ПРЕДЕЛАХ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО САЯНА.....	236
<i>А.А. Зорина</i> РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОПОЖАРОВ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРНОГО УРАЛА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 5000 ЛЕТ ПО ДАННЫМ ПАЛЕОАНТРАКОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРЕЗА ХОРПИЯ	238
<i>Е.А. Коркина, С.Е. Коркин</i> ТОРФЯНЫЕ ПАЛЕОПОЧВЫ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ	240
<i>О.Л. Кузнецов</i> РАЗВИТИЕ ЭКОСИСТЕМ ААПА БОЛОТ ФЕННОСКАНДИИ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	242
<i>Н.В. Кузьменкова, А.Н. Цыганов, Ю.А. Мазейб, Н.Г. Мазейб, Т.Ю. Репкина, Е.А. Еременко</i> ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Рb-210 В ПРОФИЛЕ ТОРФЯНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ.....	246
<i>А.Б. Михайлова</i> ПРОЦЕСС БОЛОТООБРАЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ КАНСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ (КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ).....	250
<i>Д. С. Щуряков</i> ОСОБЕННОСТИ ДОЛИННОГО БОЛОТООБРАЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА ИШТАН	252
<i>V.V. Chakov</i> FEATURES OF MIRE ECOSYSTEM DEVELOPMENT ON CRYOLITOZONE AREA OF THE LOWER AMUR REGION.....	254

**Remote sensing and marsh mapping. Processing
of Unmanned Aerial Vehicle data in carbon balance assessment
Дистанционное зондирование и картографирование болот.
Обработка данных с БПЛА в оценке углеродного баланса**

<i>Д.В. Ильясов, А.А. Каверин, А.В. Ниязова, Ю.В. Курпьянова, А.Ф. Сабреков, Е.А. Заров, И.В. Филиппов, Е.Д. Лапшина</i> ЛИДАРНЫЕ И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ В ИЗУЧЕНИИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА БОЛОТ: ОПЫТ, ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И БУДУЩИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ	259
<i>А.А. Каверин, Д.В. Ильясов, Г.Н. Ганасевич, В.Р. Курбатова, А.А. Ернова</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ С БВС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ.....	262
<i>М.А. Медведева, В.Ю. Иткин</i> КАК ОПРЕДЕЛИТЬ ТОРФЯНОЙ ПОЖАР ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ	263
<i>Т. В. Орлов, К.Л. Шахматов, Ю.В. Фурса, М.В. Архипова, В.В. Бондарь</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ ПО ОБВОДНЕНИЮ ОСУШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ	267

Т.В. Орлов, М.В. Архипова, В.В. Бондарь

ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЭКСПРЕСС КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ
РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НАРУШЕННЫХ ЗАБРОШЕННЫХ ТОРФЯНИКОВ
ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ.....270

С.С. Шинкаренко, Е.А. Дюкарев, С.А. Барталев, Е.А. Головацкая

ПЕРСПЕКТИВЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ТИПОВ БОЛОТ
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....274

Научное издание

**ЗАПАДНО-СИБИРСКИЕ ТОРФЯНИКИ И ЦИКЛ УГЛЕРОДА:
ПРОШЛОЕ И НАСТОЯЩЕЕ**

**Материалы Седьмого международного полевого симпозиума
(Ханты-Мансийск, Белоярский 15 – 27 августа 2024 г.)**

**WEST SIBERIAN PEATLANDS AND CARBON CYCLE:
PAST AND PRESENT**

**Proceedings of the Seventh International Field Symposium
(Khanty-Mansiysk, Beloyarsky, 15 – 27 August 2024)**

На обложке

*спутниковое изображение Landsat-7 комплексных болот
Кондинской низменности (нижнее течение р. Конда)*

Издание подготовлено в авторской редакции

Подписано к печати 08.06.2024 г.

Формат 60×84 1/8.

Бумага для офисной техники.

Гарнитура Arial.

Усл. печ. л. 33.25.

Тираж 250 экз. Заказ № 2597.

Отпечатано на оборудовании

Издательского Дома

Томского государственного университета

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Тел. 8+(382-2)–53-15-28

Сайт: <http://publish.tsu.ru>

E-mail: rio.tsu@mail.ru