

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Environmental Dynamics and Global Climate Change



Том
Volume

16

Выпуск
Issue

2

2025



ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Volume 16
Issue 2

2025

<https://edgcccjournal.org>

EDITORIAL BOARD

EDITORS-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Office

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

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

Founder:

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

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

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

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

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Том 16
Выпуск 2
2025

Журнал издается с 2008 года

<https://edgccjournal.org>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЕ РЕДАКТОРЫ

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

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

Редакция

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

Учредители:

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

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

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

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

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

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

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

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

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

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ / THEORETICAL WORKS

Pavinsky S.V., Stepanenko V.M., Dyukarev E.A.

Comparison of two schemes of radiation transfer within the vegetation canopy based on measurements at the Mukhrino Carbon Polygon 58-68

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ / EXPERIMENTAL WORKS

Litvinov L.V., Zarov E.A., Ivanova I.S.

Hydrochemical differentiation in bog ecosystems 69-80

Egorov A.A., Glukhova T.V., Shirokovskaya A.A.

Dynamics of carbon stock in the stand of Pinetum Andromedo-Eriophoroso-Sphagnum over 50 years under extensive drainage in the conditions of the subtaiga of European Russia (West Dvina Peatland-Forest Station) 81-90

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ / NOTES

Jheeta S., Kotsyurbenko O.R., Palacios-Perez M., Heredia-Barbero A., de Farias S., Dominik M., Chatzitheodoridis E., McGrath K., Kambham S.L., Safonova M., Ray D.

How Can Discussions and Recommendations from the Blue Earth Project Influence Politicians and Voters in Democracies? ... 91-94

COMPARISON OF TWO SCHEMES OF RADIATION TRANSFER WITHIN THE VEGETATION CANOPY BASED ON MEASUREMENTS AT THE MUKHRINO CARBON POLYGON

Pavinsky S.V.^{1}, Stepanenko V.M.^{2,3,1}, Dyukarev E. A.^{4,3}*

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва

³Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

⁴Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

*stanislavpavinskij@gmail.com

Citation: Pavinsky S.V., Stepanenko V.M., Dyukarev E.A. 2025. Comparison of two schemes of radiation transfer within the vegetation canopy based on measurements at the Mukhrino Carbon Polygon. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(2): 58-68.

DOI: 10.18822/edgcc642575

АННОТАЦИЯ

С использованием данных автоматических наблюдений, проводимых на карбоновом полигоне «Мухрино», были сопоставлены две схемы расчёта переноса радиации внутри растительного полога: схема многократных отражений и модель переноса радиации в двухпоточном приближении. Показано, что последняя имеет чувствительность как к заданию пропорции между прямой и рассеянной радиацией, поступающей из атмосферы, так и к уточнению параметров отражения и пропускания для листьев путем разбиения спектра на несколько частей. Продемонстрировано, что при задании одних и тех же оптических параметров двухпоточная схема имеет более высокую степень согласованности с наблюдениями, чем схема многократных отражений.

Ключевые слова: солнечная радиация, модели переноса радиации внутри растительного полога, карбоновый полигон «Мухрино», автоматические наблюдения.

ABSTRACT

Models of radiation transfer within vegetation cover are an important component of the Earth system models, since solar radiation is the main source of energy on Earth and determines the thermal regime of the soil. It also significantly depends on the interception of the radiation by vegetation. The aim of this work is to evaluate the accuracy of a two-stream model of radiation transfer and a multiple reflection model that approximates radiation fluxes within vegetation cover using geometric series. Validation and comparison of the models were conducted using automatic observations recorded in a forest ecosystem at the Mukhrino carbon polygon. It is shown that the latter model is sensitive both to setting the proportion between atmospheric direct and diffuse radiation coming from the atmosphere and to refining the reflection and transmission parameters for leaves by dividing the spectrum into several parts. It is demonstrated that when setting the same optical parameters, the two-stream scheme has a higher degree of consistency with observations than the multiple reflection scheme.

Keywords: solar radiation, models of radiation transfer in vegetation canopies, Mukhrino Carbon Polygon, automatic observations.

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником энергии на Земле является солнечная радиация. Она определяет абсолютные значения и суточные колебания температуры поверхности, которой она достигает, и, как следствие, устанавливает термический режим атмосферы. Температурный режим почвы, покрытой растительностью, сильно отличается от оголенных участков вследствие поглощения части радиации растительным пологом, который, в свою очередь, тратит часть приходящей энергии на транспирацию и поэтому нагревается менее существенно. В метеорологических, гидрологических моделях и моделях Земной системы реализованы различные схемы переноса радиации внутри растительного полога. Они необходимы для расчета теплообмена подстилающей поверхности с приземным слоем, а

также для достоверного воспроизведения различных биогеохимических процессов внутри почвы – одной из составляющих круговорота углерода и метана. Все это особенно значимо при моделировании на длительные промежутки времени и сказывается на точности прогноза изменения климата. Помимо актуальности в моделировании динамики окружающей среды, разработка радиационных схем также представляет самостоятельный интерес.

Существует несколько подходов к моделированию процессов радиационного переноса внутри растительности. Среди них можно выделить два наиболее распространенных подхода: статистический метод и метод, основанный на решении уравнения переноса. Также существует подход, в котором растительный полог представляет собой слой, пропускающий известную часть радиации. Внутри растительности допускаются множественные переотражения, а потоки радиации описываются суммами геометрической прогрессии. Рассмотрим кратко эти подходы ниже.

Статистический метод или метод Монте-Карло подразумевает нахождение среднестатистических характеристик марковской цепи столкновений лучей света с объектами. Этому методу посвящено достаточно большое количество работ, в том числе обзорная статья [Disney et al., 1999], диссертация [Govaerts, 1996], а также публикации российских исследователей [Sergeev, Levashova, 2022; Levashova, Mukhartova, 2018]. Для расчета траекторий лучей света – «фотонов» – необходимо детальное задание геометрии растительности, с которой они взаимодействуют, в частности расположение растений в пространстве, их листьев, стеблей и стволов. Например, в работе [Sergeev, Levashova, 2022] в рамках такого подхода рассмотрено взаимодействие коротковолнового излучения с ветвями березы, а в статье [Levashova, Mukhartova, 2018] для расчета радиационного переноса была разработана фрактальная модель дерева. В силу вычислительной трудоёмкости данный метод применим для ограниченных территорий, а задание большого количества геометрических параметров растительности усложняет обеспечение необходимыми внешними данными. В то же время детальность подобных моделей позволяет использовать их результаты как данные для валидации более простых схем радиационного переноса.

Способ расчета потоков радиации внутри растительного полога путем нахождения решения уравнения переноса излучения получил широкое распространение в задачах гидрометеорологии. Этот метод детально изложен в монографии [Ross, 1981], в особенности там описаны различные методы параметризации фитометрических характеристик растения и их распределения по высоте. Помимо этого, в книге приведено уравнение переноса радиации внутри неоднородного растительного полога, излагаются основные приближения и некоторые частные решения; слой растительности при этом считается мутной сплошной средой. В работах [Qiudan, Shufen, 2006, 2007] представлена модифицированная на случай нескольких вертикальных слоёв растительности радиационная схема, а также аналитическое решение уравнения переноса. В публикации [Levashova, Mukhartova, 2018] представлена радиационная схема, учитывающая горизонтальную неоднородность растительности.

В работах [Dickinson, 1983; Sellers, 1985] описано двухпотокное приближение уравнения переноса, аналогичное применяемому для атмосферы [Coakley, Chylek, 1975]. Оно основано на предположении о том, что интенсивность излучения в направлениях верхней и нижней полусфер не зависит от угла распространения. Это допущение позволяет линеаризовать это уравнение и упрощает его аналитическое решение. Полное изложение этого метода, включая спецификацию параметров, таких как коэффициент отражения и коэффициент пропускания для листьев и стволов в области видимого и ближнего инфракрасного участков спектра, коэффициент отклонения от случайного распределения наклона листьев, а также альбедо почвы, изложено в техническом описании [Bonan, 1996]. Данная схема переноса радиации внутри полога реализована в модели Земной системы ИБМ РАН [Volodin et al., 2016; Volodin, Gritsun, 2020] в рамках блока деятельного слоя суши [Volodin, 2016; Stepanenko et al., 2024] ИБМ РАН-МГУ/ТерМ.

Один из наиболее простых подходов предполагает расчет баланса коротковолновой радиации растительного покрова и почвы с допущением, что известная часть солнечной радиации проходит сквозь растительность, представленную одним слоем, достигая почвы, а часть отражается от растительного полога и поверхности земли (альбедо также считается известным); отражение и поглощение внутри слоя происходит бесконечное число раз, что приводит к выражению результирующего потока через геометрическую прогрессию. Этот подход применен, например, в модели снежного покрова и поверхности земли SNOWPACK [Gouttevin et al., 2015].

Цель данной работы – оценить качество двухпотокowej модели переноса радиации [Bonan, 1996] и модели многократного отражения [Gouttevin et al., 2015] на основе данных автоматических наблюдений, проводимых в лесной экосистеме на карбоновом полигоне «Мухрино». Эти модели

рассматриваются в качестве альтернативных опций для описания радиационного баланса полога растительности в модели деятельного слоя суши TerM.

Задачи работы:

- оценить важность учёта зависимости оптических параметров растительности от длины волны: достаточно ли разбиения спектра на области видимого и ближнего инфракрасного излучения или необходимо привлекать более детальное спектральное распределение оптических величин;
- определить чувствительность двухпоточковой модели к соотношению потоков рассеянной и прямой радиации, поступающих из атмосферы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Модель двухпоточкового приближения уравнения переноса

Уравнения переноса радиации в двухпоточковом приближении имеют следующий вид:

$$-\bar{\mu} \frac{dI \uparrow}{d(L(z) + S(z))} + (1 - (1 - \beta)\omega)I \uparrow - \omega\beta I \downarrow = \omega \bar{\mu} k \beta_0 e^{-k(L(z)+S(z))}, \#(1)$$

$$\bar{\mu} \frac{dI \downarrow}{d(L(z) + S(z))} + (1 - (1 - \beta)\omega)I \downarrow - \omega\beta I \uparrow = \omega \bar{\mu} k (1 - \beta_0) e^{-k(L(z)+S(z))}. \#(2)$$

Они записаны с допущением, что интенсивность рассеянного излучения I изотропна во всех направлениях верхней и нижней полусфер: $I(L(z) + S(z), \mu) = I \uparrow$, $I(L(z) + S(z), -\mu) = I \downarrow$. Здесь μ обозначает косинус зенитного угла в пределах верхней полусферы, а $-\mu$ – нижней. $L(z)$ и $S(z)$ – листовой и стеблевой индексы, зависящие от высоты z , м; они принимаются равными нулю на верхней границе крон. Интенсивности рассеянного излучения в уравнениях (1-2) нормированы на плотность потока прямой солнечной радиации на верхней границе растительности. β , β_0 – параметры рассеяния наверх ($\mu > 0$) для рассеянного и прямого излучения, соответственно, ω – коэффициент рассеяния отдельных листьев (иголок) и стеблей, представляющий собой сумму коэффициента отражения и пропускания листа или стебля, $G(\mu)$ – площадь проекции листа единичной площади на плоскость, перпендикулярную направлению μ . $G(\mu) = 0.5 - 0.633\chi - 0.33\chi^2$; χ – мера упорядоченности расположения листьев относительно горизонта: преимущественно горизонтально ($\chi = 1$), хаотично, что характерно для хвой ($\chi = 0.01$), или вертикально ($\chi = -1$). Значения параметра для разных типов растительности приведены в [Bonan, 1996]. Использовано обозначение $\bar{\mu} = \int_0^1 \mu/G(\mu) d\mu$, а также $k = \frac{G(\mu')}{\mu'}$, μ' – косинус зенитного угла нисходящего из атмосферы излучения. Все величины в уравнениях (1-2) безразмерны.

Решение системы дифференциальных уравнений производится отдельно для прямой и для рассеянной нисходящей из атмосферы радиации. Граничные условия для прямой радиации выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} I \downarrow = 0, & L + S = 0, \\ I \uparrow = \alpha_{soil}(I \downarrow + e^{-k(L+S)}), & L + S = \max(L + S); \end{cases} \#(3)$$

то есть на верхней границе крон рассеянная нисходящая радиация равна нулю, а у почвы, где сумма листового и стеблевого индекса достигает максимума, интенсивность направленного в верхнюю полусферу рассеянного излучения есть сумма отраженной от почвы прямой и рассеянной радиации; α_{soil} – альбедо почвы. В условиях только рассеянного нисходящего из атмосферы излучения правая часть в уравнениях (1-2) равна нулю, а интенсивности нормируются на рассеянную радиацию. Задаются следующие граничные условия:

$$\begin{cases} I \downarrow = 1, & L + S = 0, \\ I \uparrow = \alpha_{soil} I \downarrow, & L + S = \max(L + S); \end{cases} \#(4)$$

Уравнения (1-2) – это линейная неоднородная система дифференциальных уравнений, она имеет аналитическое решение. Зная его, можно найти долю рассеянной и прямой коротковолновой радиации, которая проникла через растительный полог и достигла поверхности почвы. Ниже представлено уравнение для поглощенной пологом коротковолновой радиации, нормированной на нисходящее из атмосферы прямое излучение:

$$\bar{I}^{\mu} = 1 - I_{out} \uparrow^{\mu} - (1 - \alpha_{soil}) I_{out} \downarrow^{\mu} - (1 - \alpha_{soil}) e^{-k(L+S)_H}, \#(5)$$

где $I_{out} \uparrow^{\mu}$ и $I_{out} \downarrow^{\mu}$ – рассеянная радиация, нормированная на нисходящую прямую, распространяющаяся из полога в направлении атмосферы и почвы соответственно. $(L + S)_H$ – сумма листового и стеблевого индекса на нижней границе растительности; $e^{-k(L+S)_H}$ – прямая нисходящая из атмосферы радиация, дошедшая до почвы; α_{soil} – альбеда почвы, зависящее от ее влажности и цвета [Bonan, 1996].

Уравнение поглощённой пологом коротковолновой радиации, нормированной на нисходящее рассеянное излучение:

$$\bar{I} = 1 - I_{out} \uparrow - (1 - \alpha_{soil}) I_{out} \downarrow \#(6)$$

где $I_{out} \uparrow$ и $I_{out} \downarrow$ – рассеянная радиация, нормированная на нисходящую рассеянную, распространяющаяся от полога в направлении атмосферы и почвы соответственно.

Оптические параметры, такие как отражательная способность и коэффициент пропускания, сильно варьируются в зависимости от длины волны, поэтому уравнения (1-2), (5-6) имеет смысл рассматривать для ограниченных диапазонов длин волн. На настоящий момент потоки радиации в модели деятельного слоя суши TerM рассчитываются только для двух диапазонов длин волн – видимого спектра (380-760 нм) и ближнего инфракрасного (760-1400 нм). Используемые оптические параметры приведены в [Bonan, 1996].

В ходе данной работы программная реализация схемы расчета потоков была доработана таким образом, чтобы она позволяла разбивать область спектра на произвольное количество интервалов и считать потоки с параметрами, осредненными по этим интервалам, а не по всему видимому и ближнему инфракрасному спектру. Это было сделано путем задания значений оптических параметров как кусочно-линейных функций.

Без уточнения некоторых оптических параметров такое улучшение не имело бы смысла. Поэтому на основе данных измерений [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014] были уточнены коэффициенты отражения и пропускания для листьев хвойного вечнозеленого леса. В таблице 1 приведены их значения для функционального типа растительности «вечнозелёный хвойный лес», задающие кусочно-линейную функцию от длины волны.

Таблица 1. Значения коэффициентов отражения и пропускания листьев для типа растительности «вечнозелёный хвойный лес» на основе данных [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014]

Table 1. Leaf reflectance and transmittance values for the "evergreen needleleaf forest" vegetation type, according to [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014]

Коэффициент отражения	0.05	0.05	0.10	0.05	0.37	0.36	0.33	0.34	0.07	0.20
Коэффициент пропускания	0.00	0.03	0.08	0.03	0.35	0.35	0.31	0.32	0.05	0.16
λ , нм	380	500	550	680	750	1120	1170	1300	1450	1600

Радиационная модель, используемая в SNOWPACK

В модели SNOWPACK [Gouttevin et al., 2015] используется радиационная схема [Taconet et al., 1986], адаптированная [Stähli et al., 2009]. Растительный полог рассматривается как слой, взаимодействующий с определённой долей σ_f падающей на него радиации. Он имеет альбеда однократного рассеяния α_{skin} . Поверхность почвы имеет альбеда α_{soil} . Коротковолновая радиация, попавшая внутрь полога, отражается от растительности к почве и от почвы вверх. Процесс многократных отражений аппроксимируется бесконечными суммами потоков, поглотившихся почвой и растительностью, а также потоков, ушедших в атмосферу. Применяя формулу суммы бесконечной геометрической прогрессии, можно получить следующие уравнения коротковолновых балансов для верхней границы растительности ($SW_{net,skin}$) и поверхности почвы ($SW_{net,soil}$):

$$SW_{net,skin} = SW \downarrow (1 - \alpha_{skin}) \sigma_f \left(1 + \frac{\alpha_{soil}(1 - \sigma_f)}{1 - \sigma_f \alpha_{soil} \alpha_{skin}} \right), \#(7)$$

$$SW_{net,soil} = \frac{SW \downarrow (1 - \alpha_{soil})(1 - \sigma_f)}{1 - \sigma_f \alpha_{soil} \alpha_{skin}}, \#(8)$$

где $SW \downarrow$ – нисходящая из атмосферы суммарная (прямая и рассеянная) коротковолновая радиация, Вт м⁻². Считается, что коэффициент σ_f зависит от листового индекса LAI (м² м⁻²) по формуле $\sigma_f = 1 - \exp(-k_{LAI} LAI)$, где k_{LAI} принимает характерные значения в диапазоне 0.4-0.8 [Gouttevin et al., 2015].

Данная схема является одной из наиболее простых параметризаций переноса радиации внутри растительного полога. Оптические параметры, участвующие в ней, также можно варьировать в зависимости от длины волны. В силу своей простоты она с ошибкой отражает реальные физические процессы, поэтому от нее стоит ожидать результат, который в меньшей степени согласуется с измерениями, чем результат модели, основанной на решении уравнения переноса, описанной выше. Однако из-за малого количества параметров она довольно просто может быть откалибрована.

Объекты

Измерения, на основе которых сравнивались две радиационные модели, проводились на вышке пульсационных измерений. Она расположена на территории карбонового полигона «Мухрино» (60.89 с.ш., 68.71 в.д.), в темнохвойно-осиновом зеленомошном лесу с максимальной высотой деревьев 28 метров (Рис. 1). Потоки нисходящей и уходящей коротковолновой радиации над лесом измерялись на высоте 40 метров. Период измерений – 20 июня – 18 июля 2024 года. Шаг измерений – 10 секунд. Стоит отметить, что на данной метеостанции измеряется довольно большое количество параметров, в том числе радиационный баланс (коротковолновая + длинноволновая радиация) близ поверхности земли, а также ее температура и температура воздуха на разных высотах. Это позволяет рассчитывать потоки длинноволновой радиации с поверхности почвы по закону Стефана – Больцмана и тем самым найти баланс коротковолновой радиации у земли, однако в таком случае значения баланса будут являться отчасти модельными, так как для нахождения длинноволнового баланса почвы необходимо также рассчитать поток длинноволнового излучения из полога и атмосферы, направленный к земле. В силу поправки расчета результат будет отличаться от наблюдавшихся в действительности значений, поэтому модельные расчеты баланса коротковолновой радиации у поверхности почвы не валидировались.



Рис. 1. Темнохвойно-осиновый зеленомошный лес около высотной мачты карбонового полигона «Мухрино», по данным измерений которой верифицировались радиационные схемы

Fig. 1. Forest around the eddy covariance station at the Mukhrino carbon measurement supersite. Based on the station's measurements, the radiation schemes were verified

Для измерений коротковолновых потоков над растительностью использовался прибор Kipp & Zonen CNR 4, диапазон длин волн – 300-2800 нм. Его чувствительность для данного диапазона составляет 7-20 мкВ Вт⁻¹ м². Ошибка, связанная с зенитным углом приходящих к прибору лучей (при значениях менее 80°), составляет менее 20 Вт м⁻² при плотности потока 1000 Вт м⁻². Для измерения баланса радиации под пологом леса использовался прибор Kipp & Zonen NR Lite с диапазоном длин волн 0.2-100 мкм, чувствительность – 10 мкВ Вт⁻¹ м², погрешность, обусловленная углом наклона приходящей радиации, составляет менее 30 Вт м⁻².

Методы расчета

Валидация моделей проводилась путем сравнения результатов моделирования двух радиационных схем с данными измерений потоков коротковолновой радиации над растительным пологом. Перед тем как перейти к анализу получившихся результатов, остановимся на спецификации параметров моделей и внешних данных.

Как для модели, основанной на переотражениях, так и для двухпоточкового приближения уравнения переноса необходимо задание листового индекса LAI . Он был рассчитан на основании данных измерений со спутника SuperView-1 с мультиспектральным разрешением 2 метра. Диапазоны сенсора: ближний ИК – 770-890 нм, красный – 630-690 нм. Листовой индекс рассчитывался аналогично статье [Saito et al., 2001] следующим образом: $LAI = 0.57 \exp(2.33NDVI)$, где $NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$. NIR – отражательная способность в области ближнего ИК-диапазона, R – отражательная способность в области видимого красного цвета. Было получено значение листового индекса 3.5.

Коэффициент затухания k_{LAI} , используемый для вычисления доли радиации, с которой взаимодействует растительный полог (в схеме SNOWPACK), был принят равным 0.6, тогда как в работе [Gouttevin et al., 2015] его допустимые значения составляют 0.4-0.8.

Для двухпоточковой модели необходимо задавать информацию о пропорции прямой и рассеянной радиации, поступающей из атмосферы. Однако измерения отдельно прямой и рассеянной компонент радиации на данной станции не проводятся. Их соотношение было задано на основе данных многолетних наблюдений, проведенных на метеорологической станции Сытомино. Она находится в одноименном селе, расположенном на реке Оби, примерно в 150 км к востоку от карбонового полигона. Данные со станции о суммах прямой и рассеянной солнечной радиации при средних условиях облачности за июль приведены в [Pilnikova, 1998], табл. 1.8, 1.9. Средняя сумма прямой радиации в июле – 341 МДж м⁻², а рассеянной – 290 МДж м⁻². Поэтому доля прямой радиации от суммарной была принята равной $341/(290+341) = 0.54$.

Для разбиения спектра радиации на некоторое число промежутков необходимо также обладать информацией о зависимости монохроматической интенсивности потока радиации, поступающего из атмосферы, от длины волны. В таблице 2, составленной на основе стандарта [ASTM G173-03, 2003], приведена информация об отношении плотности потока на определенных интервалах длин волн к суммарной плотности потока нисходящей коротковолновой радиации. Доля всего видимого излучения была задана как 0.6. Распределение солнечной радиации по спектру зависит от высоты солнца, аэрозольного состава воздуха [Gates, 1966], а также от других особенностей воздушной массы, сквозь которую проходит солнечный свет. В данной работе распределение задано постоянным, и эти факторы не учитываются.

При модельных расчётах с разбиением спектра на видимый и ближний инфракрасный диапазоны использовались оптические параметры, представленные в документации [Bonan, 1996]. Коэффициент отражения листа для типа растительности «вечнозелёный хвойный лес» в ней задано как 0.07 и 0.35 для видимой и ближней ИК областей спектра, соответственно. Значения коэффициента пропускания листа – 0.05 и 0.1 соответственно. Коэффициенты отражения веток и стволов – 0.16 и 0.39. Коэффициенты пропускания веток и стволов – 0.001 и 0.001. Альбеда почвы в модели [Bonan, 1996] рассчитывается с учетом ее влажности и зависит от типа почвы, но не зависит от угла падения лучей, то есть параметр одинаков как для рассеянного, так и для прямого излучения. Всего в модели представлено 8 типов почв от темной к светлой, а также почвы пустынь. В данной работе альбеда почвы оценивалось как средневзвешенное значение по 8 типам при 0.2 объема воды на единицу объема почвы. Для видимого излучения альбеда составило 0.099, для ближнего инфракрасного – 0.184.

В модельных экспериментах с разбиением спектра на 8 диапазонов в схеме двухпоточкового приближения уравнения переноса [Bonan, 1996] использовались параметры отражения и

пропускания, представленные в таблице 1. По этим значениям строился кусочно-линейный интерполянт, осредняя который по диапазонам из таблицы 2 были получены значения параметров отражения и пропускания для 8 интервалов (Табл. 2). Коэффициенты пропускания и отражения для веток и альbedo почвы не изменялись.

Альbedo однократного рассеяния листьев для модели [Gouttevin et al., 2015] задавалось таким образом: для всей области коротковолновой радиации как осредненное из значений коэффициента отражения для видимой и ИК-частей спектра [Bonan, 1996] ($\alpha_{skin} = 0.07 \frac{760-380}{1400-380} + 0.35 \frac{1400-760}{1400-380}$); при разбиении на 8 интервалов, так же как и для двухпотоковой схемы – из таблицы 2. Альbedo почвы было задано аналогичным образом: $\alpha_{soil} = 0.1 \frac{760-380}{1400-380} + 0.184 \frac{1400-760}{1400-380}$. Все графики были построены с осреднением потоков за 5-минутные интервалы.

Таблица 2. Средняя доля интенсивности радиации в различных диапазонах длин волн в суммарном потоке коротковолнового излучения у поверхности Земли [ASTM G173-03, 2003]; коэффициенты отражения и пропускания листьев [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014]

Table 2. The average proportion of radiation intensity across different wavelength bands in the total shortwave radiation flux at the Earth's surface [ASTM G173-03, 2003]; leaf reflectance and transmittance values [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014]

Доля	0.14	0.16	0.15	0.13	0.18	0.12	0.07	0.05
Коэффициент отражения	0.05	0.08	0.07	0.21	0.37	0.36	0.34	0.28
Коэффициент пропускания	0.01	0.06	0.05	0.19	0.35	0.35	0.33	0.26
Диапазон длины волны, нм	380-490	490-580	580-670	670-760	760-920	920-1080	1080-1240	1240-1400

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных результатов

Баланс коротковолновой радиации над растительным пологом – это разность нисходящего и уходящего в атмосферу (отраженного) коротковолнового излучения. Так как нисходящая компонента является входной величиной для моделей и берется из данных наблюдений, валидацию целесообразно проводить путем сравнения уходящих в атмосферу потоков коротковолновой радиации.

Рассмотрим временной ход отраженной радиации (Рис. 2). Видно, что модель, основанная на двухпотоковом приближении уравнения переноса, имеет в целом хорошую степень согласованности с данными наблюдений. Однако версия с разбиением спектра на два диапазона занижает уходящие в атмосферу потоки коротковолновой радиации более чем на 20 Вт м⁻² вблизи полудня, тогда как версия с восемью диапазонами завышает на 15-20 Вт м⁻². Расхождение порядка 40 Вт м⁻² между двумя конфигурациями связано прежде всего с различным заданием коэффициента пропускания хвои. В версии с двумя диапазонами [Bonan, 1996] он принят равным 0.1 в области ближнего инфракрасного излучения, что значительно ниже измеренных значений [Hovi, Rautiainen, 2022; Noda et al., 2014], на основе которых задавались значения пропускания для восьмидиапазонной версии (см. Табл. 1), и которые составляют в среднем более 0.3 для ближнего ИК диапазона. Таким образом, во втором случае полог поглощает меньшую долю проходящей сквозь него радиации, как следствие, до почвы доходит больше излучения из атмосферы, доля которой переотражается обратно в направлении полога. В конечном итоге значения уходящей в атмосферу радиации будут также выше.

Значения нисходящей радиации в несколько раз превосходят величины отраженной, поэтому различия в первые десятки Вт м⁻² будут слабо заметны на значениях балансов. Это отражено на рисунке 3 (левая диаграмма). Среднеквадратическое отклонение результатов двухпотоковой модели составило 10.6 Вт м⁻² и 8.4 Вт м⁻² для версии с двумя и восемью диапазонами соответственно. Это говорит о том, что разбиение спектра в целом повышает качество моделирования, хоть и незначительно.

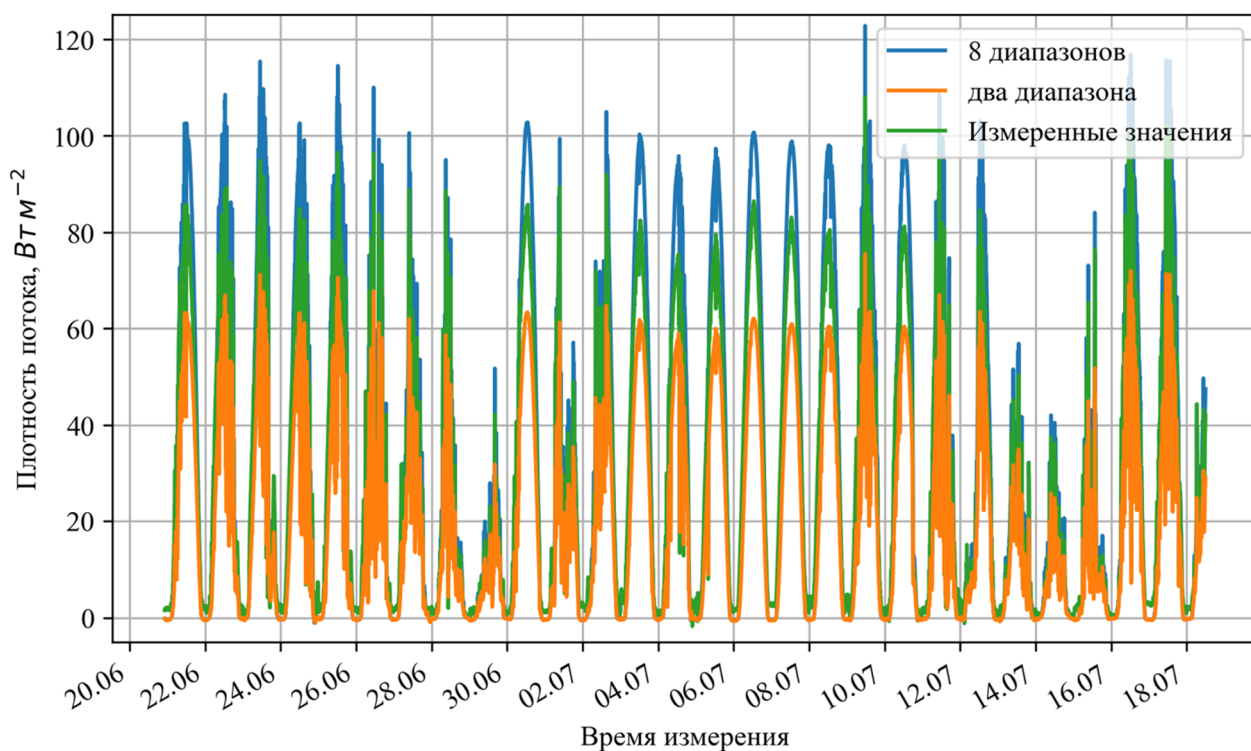


Рис. 2. Временной ход плотностей потоков отраженной радиации; доля прямой радиации от нисходящей – 0.54

Fig. 2. Temporal variation of reflected radiation flux densities; the proportion of direct radiation in the total downward flux is 0.54

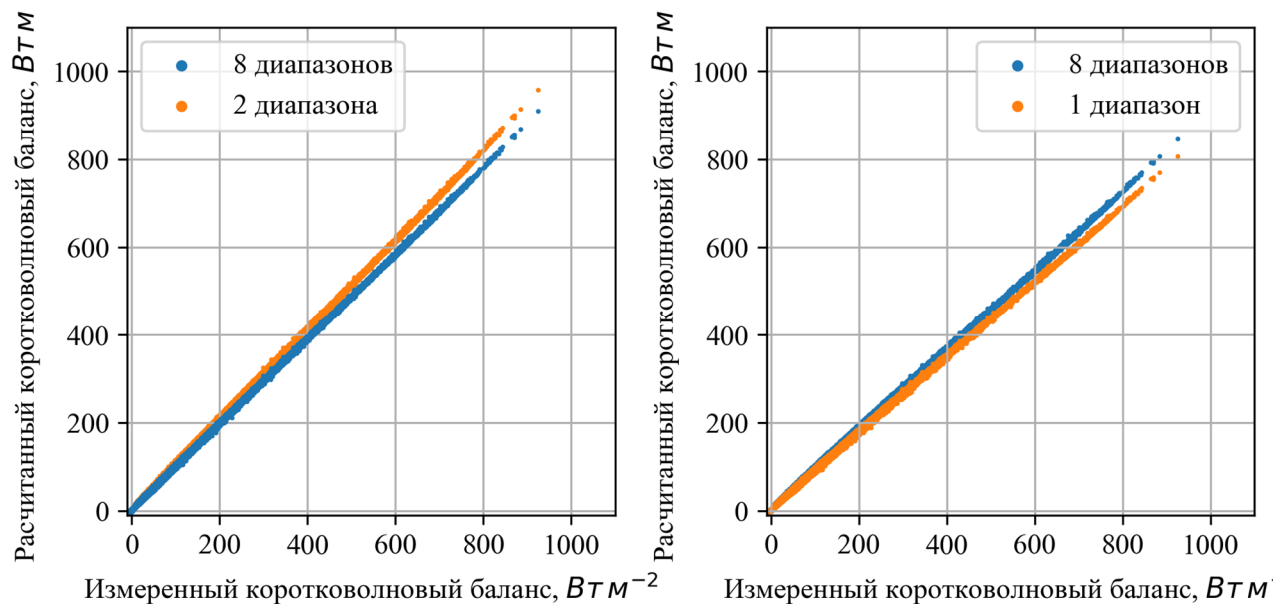


Рис. 3. Диаграммы рассеяния балансов коротковолновой радиации над лесом при разных разбиениях спектра. Левый график – двухпотоковая модель (доля прямой радиации от нисходящей – 0.54), правый – модель многократных отражений

Fig. 3. Scatter plots of shortwave radiation balance over the forest for different spectral discretizations. The left plot shows results from the two-stream model (the proportion of direct radiation in downward flux is 0.54), while the right plot shows results from the multiple-reflection model

Рисунок 4 позволяет оценить, насколько двухпотоковая модель чувствительна к отношению прямой и рассеянной радиации, поступающих из атмосферы. При облачной погоде прямой

солнечный свет не доходит до деятельного слоя, поэтому минимальная доля прямого излучения от суммарного коротковолнового была задана нулем. Максимальная доля 0.85 была задана как максимальное отношение прямой радиации к суммарной при ясном небе (время 12:30) в июле по данным наблюдений метеостанции Сытомино [Pilnikova, 1998], таблица 1.2. Как видно из левого графика, соотношение практически никак не сказывается на значениях баланса коротковолновой радиации растительности, максимальные различия составляют первые десятки Вт м^{-2} . Однако эта пропорция определяет количество радиации, проникшей до поверхности почвы. При ясном небе баланс у почвы более чем в два раза выше, чем при полностью рассеянном излучении атмосферы. Причем различия увеличиваются к полудню, так как в это время солнце находится наиболее высоко над горизонтом, и оптическая толщина леса (как однородной мутной среды) уменьшается, поскольку солнечные лучи проходят меньшее расстояние внутри растительности, а $G(\mu)$ для хвой практически не зависит от μ и равен примерно 0.5. Как следствие – до почвы доходит больше прямой солнечной радиации. Различия в значениях более заметны также из-за того, что баланс коротковолновой радиации у почвы по абсолютным значениям в несколько раз меньше такового баланса над лесом. Модель более чувствительна к пропорции прямой и рассеянной радиации, поступающей из атмосферы, чем к детальности разбиения спектра. Однако в модели Земной системы ИВМ РАН информация о пропорции и распределении нисходящей из атмосферы коротковолновой радиации есть, поэтому разбиение спектра потенциально может улучшить модельные результаты.

Модель многократных отражений [Gouttevin et al., 2015], при использовании двух диапазонов занижавшая значения баланса около полудня примерно на 100 Вт м^{-2} , после перехода к вычислениям по восьми интервалам повысила степень соответствия с измеренными данными (Рис. 5). Среднеквадратическое отклонение рассчитанных от измеренных балансов коротковолновой радиации над растительным пологом составило 43.2 Вт м^{-2} и 29.2 Вт м^{-2} для разбиения спектра на одну и на восемь частей соответственно. Рассмотрим еще раз рисунок 3. Видно, что с увеличением значений коротковолнового баланса увеличивается расхождение с данными наблюдений и что двухпотоковая схема показывает преимущественно лучший результат, особенно в середине дня. Линейность графика $f(\lambda x + \gamma y) = \lambda f(x) + \gamma f(y)$ позволяет довольно просто калибровать модели. Например, найдя функцию вида $f(x) = ax$, аппроксимирующую точки графика, можно домножать рассчитанные значения балансов на a^{-1} и ожидать высокую степень соответствия с измерениями.

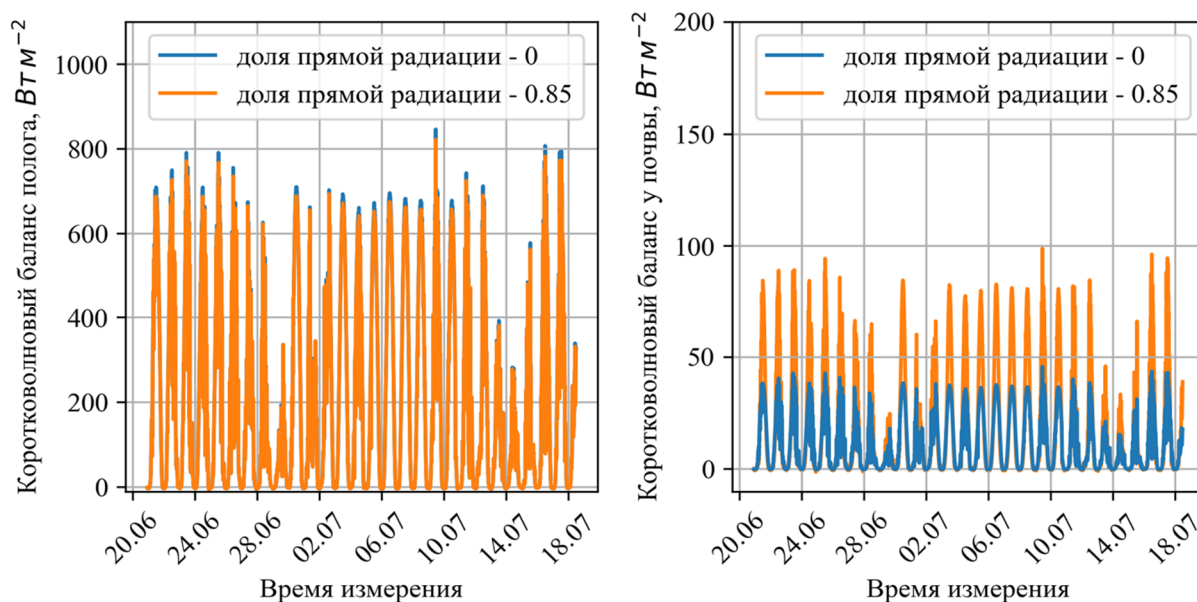


Рис. 4. Балансы коротковолновой радиации, рассчитанные по двухпотоковой модели при разном соотношении падающей прямой и рассеянной радиации с разбиением спектра на восемь частей

Fig. 4. Shortwave radiation balances calculated using the two-stream model for different ratios of incident direct and diffuse radiation, with the spectrum divided into eight bands

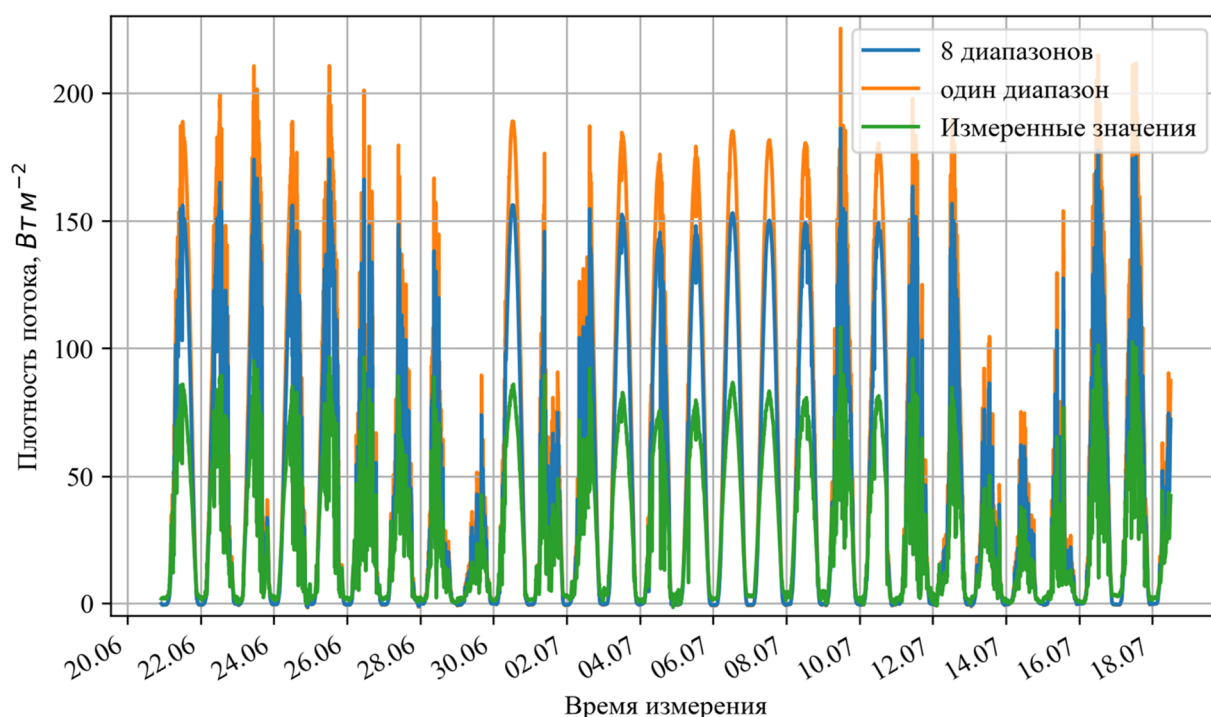


Рис. 5. Временной ход отраженной радиации по данным измерений, а также рассчитанный по схеме многократных отражений при задании альбеда однократного рассеяния листьев и почвы постоянными во всем коротковолновом диапазоне и при делении коротковолнового спектра на восемь интервалов

Fig. 5. Temporal variation of reflected radiation based on measurement data and calculations using the multiple-reflection scheme, assuming constant single-scattering albedo of leaves and soil over the shortwave range and dividing the shortwave spectrum into eight bands

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было показано, что двухпотоковая модель переноса радиации внутри растительного полога имеет высокую степень согласованности с данными наблюдений, осуществлённых в темнохвойно-осиновом лесу карбонового полигона «Мухрино» в летнее время года. Корректировка оптических параметров растительности оказала влияние на результаты моделирования, вместе с тем повышение спектрального разрешения расчётов не дало существенного улучшения качества моделирования; частично это связано с тем, что уточнены были только коэффициенты отражения и пропускания листьев, тогда как таковые параметры для стеблей и стволов, а также альбеда почвы были оставлены значениями по умолчанию для данного типа почвы и функционального типа растительности. Вклад в погрешность вносит и неточность расчета листового индекса. Было показано, что доля рассеянной радиации от суммарного коротковолнового потока, поступающего из атмосферы, существенно влияет на значение поглощённого почвой коротковолнового излучения, но слабо сказывается на значениях коротковолнового баланса над растительностью.

Также было показано, что модель, рассчитывающая потоки внутри полога как суммы геометрической прогрессии [Gouttevin et al., 2015], даже после разбиения на восемь диапазонов, при тех же оптических параметрах, что и модель [Bonan, 1996], хуже согласуется с наблюдениями.

БЛАГОДАРНОСТИ

Вышка пульсационных измерений, данные которой использовались в работе, возведена и поддерживается 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

Проверка и уточнение математических моделей выполнены в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

- Bonan G.B. 1996. *A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide*. NCAR Technical Note, NCAR/TN-417+STR. National Center for Atmospheric Research.
- Coakley J.A., Chylek P. 1975. The two-stream approximation in radiative transfer: including the angle of the incident radiation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32: 409-418.
- Dai Q., Sun S. 2006. A generalized layered radiative transfer model in the vegetation canopy. *Advances in atmospheric sciences*, 23: 243-257. DOI: 10.1007/s00376-006-0243-7
- Dai Q., Sun S. 2007. A simplified scheme of the generalized layered radiative transfer model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(2): 213-226. DOI: 10.1007/s00376-007-0213-8
- Dickinson R.E. 1983. Land surface processes and energy balance climate-surface albedos and energy balance. *Advances in atmospheric sciences*, 25: 305-353
- Disney M., Lewis P., North, P. 1999. Monte Carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling. *Remote Sensing Reviews*, 18: 163-196. DOI: 10.1080/02757250009532389
- Gates D.M. 1966. Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface. *Science*, 151: 523-529 DOI: 10.1126/science.151.3710.523
- Govaerts Y. 1996. A Model of Light Scattering in Three-Dimensional Plant Canopies: a Monte Carlo Ray Tracing Approach. PhD Thesis. Université Catholique de Louvain, Belgium.
- Gouttevin I., Lehning M., Jonas T., Gustafsson D., Mölder M. 2015. A two-layer canopy model with thermal inertia for an improved snowpack energy balance below needleleaf forest (model SNOWPACK, version 3.2.1, revision 741). *Geoscientific Model Development*, 8(8): 2379-2398. DOI: 10.5194/gmd-8-2379-2015
- Hovi A., Rautiainen M. 2022. Leaf and needle spectra for 25 boreal tree species. *Mendeley Data*, V1. DOI: 10.17632/nvgjcn5nsx.1
- Levashova N.T., Mukhartova Yu.V. 2018. A three-dimensional model of solar radiation transfer in a non-uniform plant canopy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 107(1). DOI: 10.1088/1755-1315/107/1/012101
- Noda H.M., Motohka, T., Murakami, K., Muraoka H., Nasahara K.N. 2014. Reflectance and transmittance spectra of leaves and shoots of 22 vascular plant species and reflectance spectra of trunks and branches of 12 tree species in Japan. *Ecological Research*, 29(2), 111. DOI: 10.1007/s11284-013-1096-z
- Pilnikova Z.N. 1998. *Scientific and applied handbook on the climate of the USSR*. Vol. 17. Parts 1-6. Gidrometeoizdat, St. Petersburg (in Russian). [Пильникова З.Н. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 17. Части 1-6. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998].
- Ross J. 1981. *The radiation regime and architecture of plant stands*. Dr W. Junk Publishers. DOI: 10.1007/978-94-009-8647-3
- Saito K., Ogawa S., Aihara M., Otowa K. 2001. Estimates of LAI for forest management in Okutama. Proc. 22nd ACRS 1, 600-605.
- Sellers P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8): 1335-1372. DOI: 10.1080/01431168508948283
- Stähli M., Jonas T., Gustafsson D. 2009. The role of snow interception in winter-time radiation processes of a coniferous sub-alpine forest. *Hydrological Processes*, 23(17): 2498-2512. DOI: 10.1002/hyp.7180
- ASTM International. 2003. ASTM G173-03, Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface.
- Sergeev I.D., Levashova N.T. 2022. Modeling the interaction of solar radiation with vegetation elements using the Monte-Carlo method. *Moscow University Physics Bulletin*, 4 (in Russian). [Сергеев И.Д., Левашова Н.Т. Моделирование взаимодействия солнечной радиации с элементами растительности при помощи метода Монте-Карло // Ученые записки физического факультета Московского университета. № 4.].
- Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Bogomolov V.Yu., Shangareeva S.K., Ryazanova A.A., Faykin G.M., Ryzhova I.M., Suiazova V.I., Debolskiy A.V., Chernenkov A.Yu. 2024. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, vol. 39, no. 6: 363-377. DOI: 10.1515/rnam-2024-0031
- Taconet O., Bernard R., Vidal-Madjar D. 1986. Evapotranspiration over an Agricultural Region Using a Surface Flux/Temperature Model Based on NOAA-AVHRR Data. *Journal of climate and applied meteorology*, 25: 284-307.
- Volodin E.M. 2016. Representation of heat, moisture and momentum fluxes in climate models. Fluxes at surface. *Fundamental and Applied Climatology*, 1: 28-42. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-1-28-42
- Volodin E.M. 2016. *Mathematical Modeling of the Earth System* (Iakovlev N.G., Ed.). MAKS Press.
- Volodin E.M., Gritsun A.S. 2020. Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model. *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics*, 56(3): 218-228. DOI: 10.1134/S0001433820030123

Поступила в редакцию: 05.12.2024
Переработанный вариант: 17.06.2025
Принято в печать: 14.07.2025
Опубликована: 23.07.2025

HYDROCHEMICAL DIFFERENTIATION IN BOG ECOSYSTEMS

Litvinov L.V.^{}, Zarov E.A., Ivanova I.S.*

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», Ханты-Мансийск

*l.l.v.86@icloud.com

Citation: Litvinov L.V., Zarov E.A., Ivanova I.S. 2025. Hydrochemical differentiation in bog ecosystems. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(2): 69-80.

DOI: 10.18822/edgcc677932

АННОТАЦИЯ

Олиготрофные болота представлены совокупностью микроландшафтов с изменяющимися глубиной залегания болотных вод и растительностью. Изменчивость данных условий способна влиять на скорость деструкции растительных остатков и эффективность биогенной аккумуляции соединений. Эти процессы оказывают влияние на формирование гидрохимической системы микроландшафта и болота в целом. В работе рассмотрена вариабельность гидрохимических характеристик основных микроландшафтов олиготрофного болота Мухрино, расположенного в подзоне средней тайги Западной Сибири. Целью исследования было выявление характерных особенностей формирования состава болотной воды. В качестве измеряемых параметров были выбраны концентрации катионов Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} и анионов Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , растворённого органического углерода (РОУ) и его спектральные характеристики (SUVA_{254}). Преобладающими ионами в болотных водах являются катионы Na^+ и K^+ и анионы Cl^- и SO_4^{2-} . Относительно суммы концентраций измеряемых ионов экосистемы формируют ряд: рямово-мелкоочажинный комплекс (РММК) – открытое болото – грядово-мочажинно-топяной комплекс (ГМТК) – грядово-мочажинный комплекс (ГМК) – типичный рям в порядке увеличения содержания соединений. Гидрохимической особенностью РММК являются высокие концентрации РОУ при низком содержании ионов. Характерным отличием экосистем открытого болота является формирование катионного состава преимущественно за счёт K^+ и NH_4^+ . Участки ГМТК характеризуются повышенным содержанием SO_4^{2-} в анионном составе воды, тогда как на участках ГМК наблюдаются более высокие концентрации ионов Cl^- . Тем не менее воды обеих экосистем демонстрируют низкие концентрации растворённого органического углерода (РОУ) (71,3 и 66,1 мг/л соответственно). Типичный рям отличается наиболее высоким содержанием РОУ (85,8 мг/л) и измеряемых ионов.

Ключевые слова: гидрохимия, ионный состав, растворённый органический углерод.

ABSTRACT

Oligotrophic bogs are presented by a combination of microlandscapes with varying water tables and vegetation. The variability of these features may influence the rate of plant residue decomposition and the efficiency of biogenic compounds accumulation. These processes affect the formation of the microlandscape hydrochemical system and the bog. This study examines the variability of hydrochemical features in the main microlandscapes of the Mukhrino oligotrophic bog, located in the middle taiga subzone of Western Siberia. The study aim was to identify the distinctive features of bog water composition. The measured properties included concentrations of cations (Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), and anions (Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^-), dissolved organic carbon (DOC) and its spectral characteristics (SUVA_{254}). The dominant ions in the water are Na^+ and K^+ and Cl^- and SO_4^{2-} . Relative to the total measured ion concentrations, the ecosystems form the following order of increasing compound concentration: *ryam-hollow* complex (RHC) – open bog – *ridge-hollow-pool* complex (RHPC) – *ridge-hollow* complex (RHC) – typical *ryam*. A hydrochemical feature of the RHC is high DOC concentrations with low ion content. The open bog ecosystems are characterized by a cation composition dominated by K^+ and NH_4^+ . The GHPC exhibit elevated SO_4^{2-} in the anionic composition, whereas the RHC areas show higher Cl^- concentrations. However, the waters of both ecosystems demonstrate low dissolved organic carbon (DOC) concentrations (71.3 and 66.1 mg/L, respectively). The typical *ryam* stands out with the highest DOC (85.8 mg/L) and measured ion concentrations.

Key words: hydrochemistry, ion compound, dissolved organic carbon.

Используемые сокращения

РОУ – растворённый органический углерод [Leenheer, Croue, 2003];
РММК – рямово-мелкомочажинный комплекс [Ivanov, Novikova, 1976];
ГМК – грядово-мочажинный комплекс [Ivanov, Novikova, 1976];
ГМТК – грядово-мочажинно-топяной комплекс [Ivanov, Novikova, 1976];

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные воды бореального пояса Западной Сибири представляют собой важный гидрохимический объект, вносящий значительный вклад в связь гидрологических систем материковых вод и вод Северного Ледовитого океана. Данные территории характеризуются высокой заболоченностью водосборов крупных рек, что обусловлено низкими среднегодовыми температурами и обилием осадков. Болота, преимущественно олиготрофного (верхового) типа, играют важную роль в формировании химического состава поверхностных вод, выступая в том числе значительными источниками растворённого органического углерода (РОУ). Поступающие с болот воды обогащены органическими соединениями, которые способствуют формированию кислой среды с низким содержанием неорганических компонентов в речных системах [Zarov et al., 2022]. Подобными геохимическими условиями среды характеризуется и сам торф, поровые воды которого являются важным компонентом формирования субстрата для произрастающих в экосистеме растений.

Особенностью олиготрофных болот является доминирование сфагновых мхов, которые выступают видами-эдификаторами экосистемы. Сфагновые мхи адаптированы к условиям дефицита питательных элементов и способны активно подкислять места своего произрастания, что оказывает существенное влияние на химический состав болотных вод [Rudolph, Samland, 1985]. Данный класс макрофитов обычно покрывает всю площадь болота и образует торфяную залежь, оставляя незанятыми лишь участки с открытыми водными поверхностями. По этой причине олиготрофные болота характеризуются малым видовым разнообразием [Filippov, Lapshina, 2008], но при этом их отличительной особенностью является образование различных по видовому составу мозаичных и комплексных структур (грядово-мочажинный комплекс, грядово-мочажинно-озерковые комплексы, рямы). Образование подобных микроландшафтов связывают с внешними факторами, в основном с гидрологическим режимом [Ivanov, 1953].

Ряд исследований указывает на значительное влияние химического состава воды на формирование фитоценозов болотных экосистем [Hartsock, 2021; Tahvanainen et al., 2002]. Так, более трофные участки одного болота зачастую обладают большим видовым разнообразием в сравнении с участками, воды которых менее обогащены неорганическими веществами. Трофность таких участков выражается присутствием в составе воды Ca^{2+} и HCO_3^- , что свидетельствует о принадлежности участка к мезотрофному типу питания. В то же время для вод олиготрофных болот характерно увеличение доли содержания Na^+ и Cl^- [Bourbonniere, 2009]. Химический состав болотных вод формируется под воздействием неравномерной обводнённости участков олиготрофных болот, где в зависимости от степени аэрации торфяной залежи варьируется эффективность биогенной аккумуляции минеральных соединений [Stepanova, Pokrovsky, 2011]: высокая аэрированность способствует высвобождению аккумулированных минеральных соединений, содержащихся в растительных остатках.

Основным источником минерального питания для растительности олиготрофных болот являются соединения и элементы, поступающие из атмосферы. В связи с высокой пресностью болотной воды повышение минерализации атмосферных выпадений способно изменять условия формирования болотных фитоценозов. По этой причине ненарушенные верховые болота являются крайне чувствительными к антропогенному загрязнению атмосферы [Potapova, Novilov, 2006; Preis et al., 2010]. Трансформация гидрогеохимических условий территории влечёт за собой изменения растительных сообществ [Savichev, 2016]. В долгосрочной перспективе результаты мониторинга ионного состава воды различных экосистем олиготрофных болот служат индикатором аэротехногенных нарушений территории на локальном и региональном уровнях [Potapova, Novilov, 2006; Preis et al., 2010]. Кроме того, установление вариабельности гидрохимических параметров в пределах эталонного участка, которым принято считать олиготрофное болото

Мухрино [Dyukarev et al., 2021], позволит выявить вклад отдельных экосистем в итоговый состав речных вод. Это открывает возможности для прогнозирования транспорта растворённого вещества с заболоченного водосбора.

Исходя из различных экологических условий в пределах болотных микроландшафтов, предполагается наличие дифференциации экосистем относительно гидрохимических характеристик.

Целью данного исследования было изучение основных гидрохимических параметров и их микроландшафтное распределение относительно фитоценозов, сформированных на участке олиготрофного болотного массива Мухрино. В качестве измеряемых показателей выступили растворённый органический углерод, коэффициент его ароматичности ($SUVA_{254}$) и ионный состав воды.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования относится к подзоне средней тайги Западной Сибири и расположена в 20 километрах к юго-западу от г. Ханты-Мансийска. Рассматриваемый участок представлен ненарушенным верховым болотом, где организован международный полевой стационар Мухрино (кафедра ЮНЕСКО «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата», Югорский государственный университет). В структуре болотного массива выделяются грядово-мочажинный комплекс с кустарничково-сфагновыми грядами и сфагновыми мочажинами, открытое болото с кустарничками, пушицей и редкими низкими соснами, а также осоко-сфагновые экосистемы. Наиболее обводнённые участки представлены олиготрофными шейхцериево-сфагновыми и мезоолиготрофными осоково-сфагновыми топиями. Периферийные участки болота представлены типичными рослыми рядами – древесно-кустарничково-сфагновыми биоценозами с небольшими сфагново-травянистыми мочажинами. Лесные фитоценозы вблизи болотного массива относятся к мелколиственным, темнохвойным и смешанным лесам [Dyukarev et al., 2021; Ivanov, 1953].

Климат исследуемой территории характеризуется продолжительной, суровой зимой с устойчивым снежным покровом и коротким теплым летом. Среднемесячная температура января составляет -19.2 ± 0.8 °C, среднемесячная температура июля составляет 17.1 ± 0.28 °C. Суммарное годовое количество осадков в среднем составляет 470 ± 68 мм с максимумом, приходящимся на август-сентябрь (72-84 мм) [Dyukarev et al., 2021].

В период с конца июня и до начала августа 2023 года сотрудниками Югорского государственного университета было заложено 12 пробных площадей, охватывающих все типы болотных экосистем, где было отобрано 95 образцов воды. Каждая пробная площадь апробировалась однократно в течение указанного полевого сезона. Период отбора образцов соответствовал сезону межени. На каждой пробной площади закладывались точки отбора проб воды с учетом неоднородности микрорельефа (Рис. 1, Табл. 1, Appendix). Для определения гидрохимических особенностей экосистем олиготрофного болота, помимо показателей кислотности среды (pH) и электропроводности, были измерены концентрации растворённых ионов (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}), растворённого органического углерода и коэффициент его ароматичности ($SUVA_{254}$). Исходя из показателя кислотности среды ($pH \approx 3,5$), определение концентраций HCO_3^- и CO_3^{2-} не проводилось.

На основе результатов выполненного ботанического описания были выделены следующие типы растительных сообществ: типичный рям, грядово-мочажинный комплекс, грядово-мочажинно-топяной комплекс, открытое болото, рямово-мелкомочажинный комплекс (Табл. 1). Относительно обводнённости рассматриваемые экосистемы образуют ряд: открытое болото – ГМТК – ГМК – РММК – типичный рям.

Отбор проб воды производился путем вырезания лунок размером 15x15 см и глубиной до 50 см в участке болота, которые наполнялись болотной водой. Образцы воды отбирались в предварительно промытые емкости из тёмного стекла (объём 60 мл) и хранились в холодильнике не более трех дней при температуре +4 °C в период транспортировки. Непосредственно в

лаборатории перед началом аналитических работ образцы воды были отфильтрованы через шприцевой фильтр (размер пор 0.45 $\mu\text{м}$, Whatman) и анализировались.

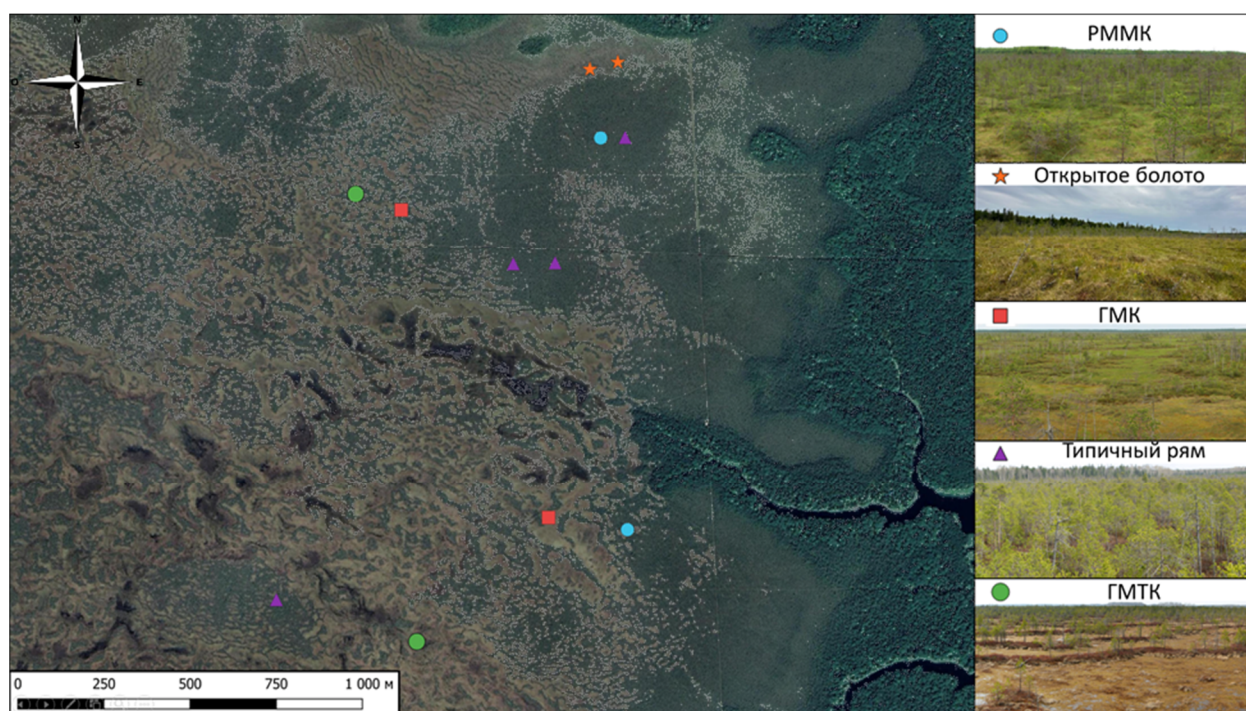


Рис. 1. Территория и точки исследования.

Fig. 1. Study site location.

Гидрохимические показатели воды (рН, электропроводность и температура воды) были измерены при помощи портативного полевого прибора Combo (Hanna, HI98129). Уровни болотных вод в каждой лунке были зафиксированы при помощи гидрогеологической рулетки после ее заполнения водой (20-30 минут).

Определение концентрации ионов в воде было выполнено на ионном хроматографе Metrohm 882 IC compact plus (Швейцария), оснащённом кондуктометрическим детектором. В качестве подвижной фазы использовались растворы азотной кислоты (4 ммоль) для определения катионов и смесь карбоната и гидрокарбоната натрия (339.2 и 84 мг), соответственно, для определения анионов. Для анализа использовались хроматографические колонки Metrosep C4-150/4.0 и Metrosep Supp 19-250/4.0 (Швейцария). В целях предотвращения загрязнения колонок использовались предколонки соответствующих моделей. Перед проведением анализа хроматографические колонки промывались два часа. Для калибровки прибора были использованы стандартные образцы ионов аммония, калия, кальция, магния, натрия, нитрата, сульфата, фосфата и хлорида (1 г/л, «ЦСОВВ», Россия). Результаты измерений интерпретированы в виде процента от суммы эквивалентных содержаний катионов и анионов.

Определение концентрации растворённого органического углерода проводилось на элементном анализаторе Thermo Scientific Flash-2000 (Германия), откалиброванном по стандарту мочевины. Определение индекса SUVA_{254} проходило на UV-спектрофотометре PERESEE T8DCS (Китай) как отношение интенсивности поглощения света при длине волны 254 нм к концентрации РОУ [Weishaar et al., 2003].

Статистические методы и визуализация данных

В качестве инструмента статистической обработки был использован метод главных компонент (PCA) – способ уменьшения размерности с применением евклидовых расстояний и матрицы корреляций при помощи выявления принципиальных (главных) направлений, охватывающих максимальную дисперсию данных [Maćkiewicz et al., 1993]. В качестве исходных переменных были выбраны концентрации всех определяемых ионов, содержание растворённого органического углерода и индекс SUVA_{254} .

Статистические расчеты и визуализация графиков были выполнены на языке программирования R [R Core Team, 2020] с применением пакета 'ggplot2' [Wickham, 2016] для визуализации данных, 'dplyr' [Hadley, 2014].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сумма ионов в болотных водах рассматриваемых экосистем увеличивается в ряду: рямово-мелкомочажинные комплексы (РММК) – открытое болото – грядово-мочажинно-топяной комплекс (ГМТК) – грядово-мочажинный комплекс (ГМК) – типичный рям. Болотные воды обогащены органическим веществом (концентрация РОУ более 90% суммы измеряемых веществ по массе). Средние значения pH и электропроводности равны $3,45 \pm 0,14$ и $79,6 \pm 21,9$ соответственно. Катионный состав воды преимущественно представлен соединениями Na^+ и K^+ (до 70% и 56% соответственно) (Рис. 2, Табл. 2). Концентрации фосфатов изменяются в диапазоне 0,01-0,015 мг/л. Преобладающими неорганическими анионами являются сульфаты и хлориды, где содержание Cl^- изменяется от 29% в наиболее сухих участках до 100% в обводнённых. Доля сульфатов увеличивается в болотных водах более сухих экосистем (до 70%). Исключением являются РММК, где при глубоком залегании болотных вод содержание сульфатов варьируется в пределах 1-15% от массы анионов.

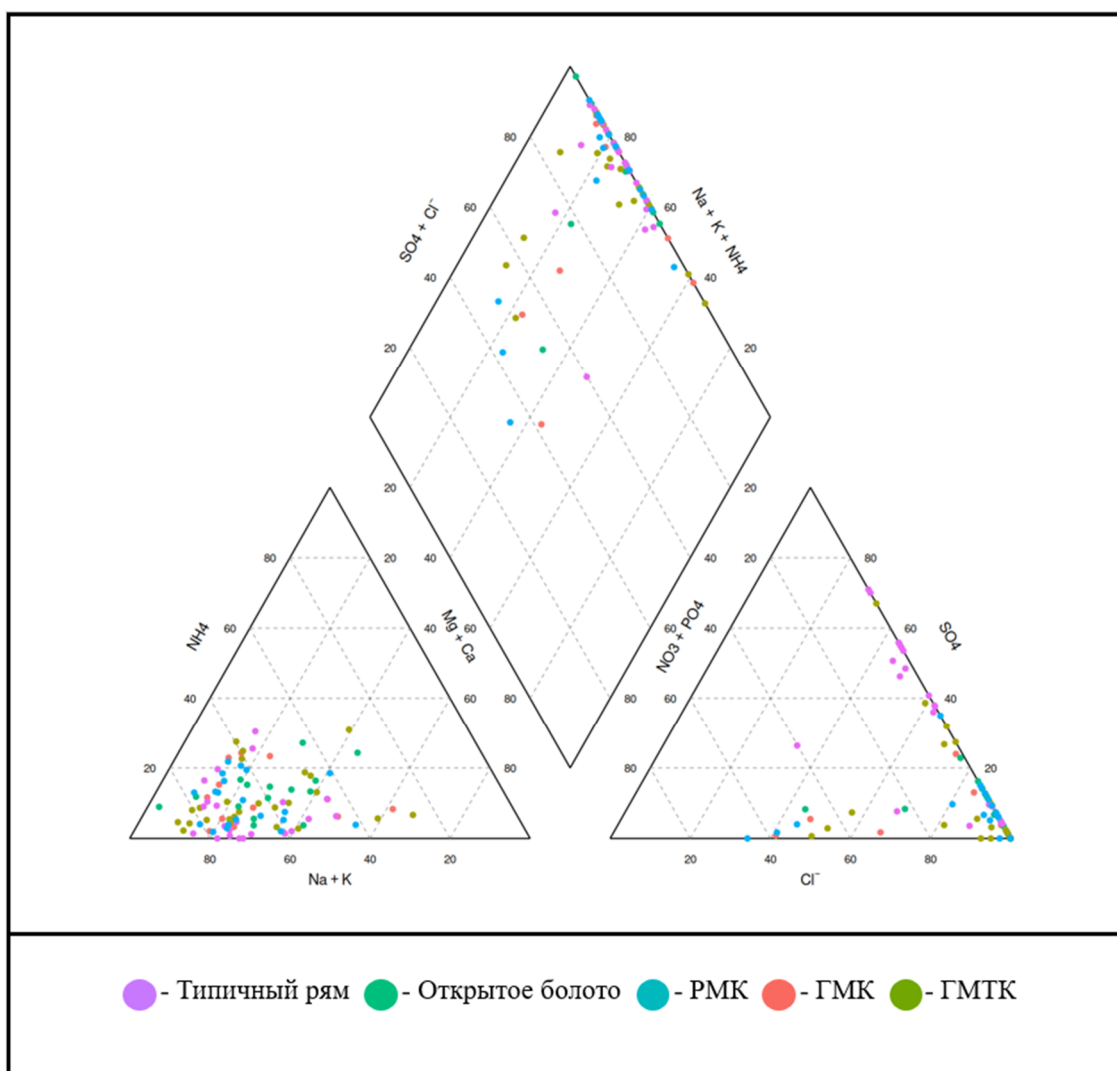


Рис. 2. Распределение ионного состава болотных вод в исследованных экосистемах на диаграмме Пайпера.

Fig. 2. Distribution of the ion composition of bog waters in the studied ecosystems on the Piper diagram.

Измеряемые ионы имеют наименьший вклад в гидрохимическую систему РММК, где их общее содержание варьируется в пределах 1,75-3,38 мг/л при высокой электропроводности ($98,15 \pm 16,0 \text{ } \mu\text{Sm/cm}$) и содержании РОУ ($85,5 \pm 17,4 \text{ мг/л}$) (Рис. 3). Ионный состав данной экосистемы представлен наименьшим разбросом значений. В катионном составе в большей степени представлены подвижные Na^+ и K^+ (0,7 мг/л и 0,58 мг/л соответственно). Растворённый минерализованный азот экосистемы чаще представлен аммонийными соединениями ($0,22 \text{ мг/л}$ NH_4^+ против $0,004 \text{ мг/л}$ NO_3^-). Наименьший вклад вносят катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , составляя лишь 22% от доли эквивалентных катионов. В неорганическом анионном составе преобладают хлорид-ионы (не менее 90%).

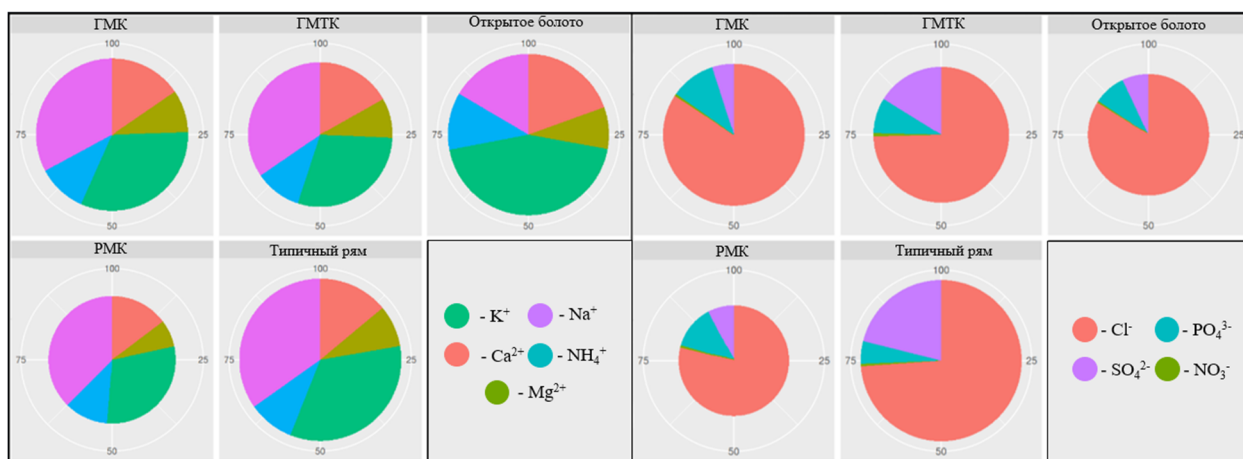


Рис. 3. Соотношение ионов в различных экосистемах.

Fig. 3. The ratio of ions in different ecosystems.

Противоположная ситуация наблюдалась на участках типичного рья, для которых характерен наибольший вклад измеряемых неорганических соединений (в среднем 6%, или 4.92 мг/л от общей суммы растворенного вещества) в химический состав вод экосистемы. Отмечено высокое содержание ионов SO_4^{2-} (со средней концентрацией 0.48 мг/л и максимальным значением 1.1 мг/л) при полном отсутствии анионов - PO_4^{3-} и NO_3^- . Содержание хлоридов в пробах варьирует в пределах 0,27-7,39 мг/л. Катионный состав вод отличается повышенными концентрациями Na^+ (в среднем 0,97 мг/л, или 73% от доли эквивалентных катионов) в сравнении с другими экосистемами. Схожими характеристиками обладают участки ГМК и ГМТК. Основной гидрохимической особенностью данных фитоценозов является низкая концентрация РОУ ($67,53 \pm 14,76$ и $63,86 \pm 5,13 \text{ мг/л}$ соответственно). Химический состав вод экосистем также различен – для ГМТК характерно растворение SO_4^{2-} , тогда как гидрохимическая особенность ГМК заключается в повышенном содержании фосфатов (0,16 мг/л в сравнении с 0,019 мг/л в рьях).

Для экосистем открытого болота характерно образование катионного состава преимущественно за счёт K^+ и NH_4^+ . Содержание данных ионов имеет среднюю концентрацию $1,25 \pm 0,61 \text{ мг/л}$ (45% от суммы катионов) для K^+ и $0,32 \pm 0,12 \text{ мг/л}$ для NH_4^+ , что на 30-40% превышает средние значения данных ионов для всего болота ($0,858 \pm 0,63 \text{ мг/л}$ и $0,25 \pm 0,18 \text{ мг/л}$ соответственно). При этом доля Na^+ (19% от суммы катионов), Cl^- (81 % от суммы анионов) и SO_4^{2-} (9% от суммы катионов) уменьшается. Также отмечено повышение концентрации Ca^{2+} на 4% (до уровня 16% от суммы катионов) относительно среднего содержания в болотных водах. Концентрации остальных компонентов находятся в пределах средних значений, обнаруженных в болотной воде.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты частично соотносятся с деятельным горизонтом (акротелмом) торфяной залежи, однако для торфов рассматриваемого болота свойственно накопление Са, в то

время как в болотных водах чаще характерны его низкие концентрации с частым преобладанием одновалентных катионов Na и K [Stepanova, Pokrovsky, 2011]. Это может быть связано как с большей растворимостью Na и K по сравнению с Ca, так и с взаимодействием Ca с гуминовыми веществами, уменьшающими его подвижность.

В результате проведённой статистической обработки гидрохимических показателей был создан график, полученный с применением метода главных компонент (Рис. 4).

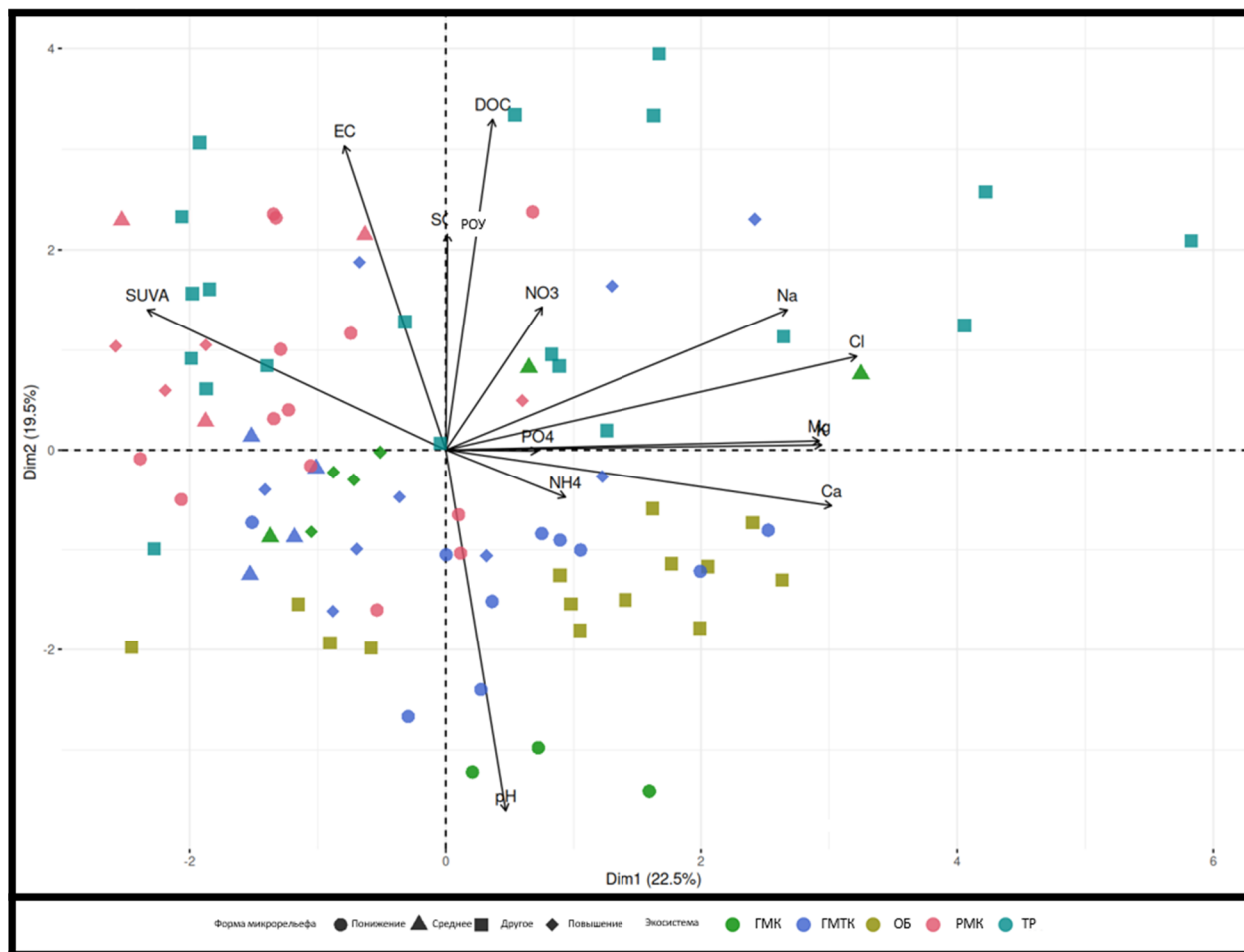


Рис. 4. Распределение точек наблюдений в пространстве главных компонент.

Fig. 4. Distribution of sample points in the principal component space.

Полученное облако точек относительно первой главной компоненты делится на группы, сонаправленные с показателями кислотности, ЕС и содержанием РОУ. Для болотных экосистем с низким УБВ характерны наиболее кислые и минерализованные воды с высоким содержанием РОУ, тогда как для участков с высоким УБВ характерно уменьшение этих показателей.

Отмечается высокая сонаправленность переменных ЕС, РОУ, SO_4^{2-} , NO_3^- . По данным переменным разошлись участки типичных ямов и гряд. Ось индекса ароматичности органических соединений (SUVA_{254}) описывается второй компонентой и расположена под прямым углом относительно оси РОУ и имеет обратную корреляцию с ионным составом в гидрохимической системе.

Группа ионов, за исключением SO_4^{2-} , NO_3^- , выделяется в отдельный кластер. Вдоль осей данных переменных исследованные экосистемы ориентированы от увеличения концентрации ионов к их уменьшению. Наибольшее количество обозначенных ионов обнаруживается в водах типичного яма и открытого болота, а также в мочажинах в ГМТК, и наименьшее – в РММК и грядах.

Группировка точек происходит относительно увлажнённости экосистем. На это указывает нагрузка на переменные pH, ЕС и РОУ, где относительно них формируются две крупные группы

скопления точек – ГМК и типичный рям. Внутри данных групп относительно расположения вдоль первой компоненты выделяются три кластера – РММК, ГМТК и открытое болото.

Распределение всех точек относительно химического состава воды происходит за счет нагрузки на переменные Na^+ , Cl^- , K^+ . Для РММК свойственно образование облака в условиях низких концентраций ионов относительно всей гидрохимической системы. Участки открытого болота характеризуются высокими концентрациями ионов при низком значении РОУ.

В качестве характерных гидрохимических особенностей экосистем выступает ряд растворённых соединений. Типичные рямы характеризуются относительно большим количеством SO_4^{2-} -ионов, что объясняется как окислительной средой в торфах, так и способностью к усваиванию меньшей доли SO_4^{2-} в процессе деятельности сульфатредуцирующих микроорганизмов ввиду увеличения аэробного слоя торфяной залежи. Это обусловлено обилием сосудистых растений с развитой ризосферой и глубоким залеганием болотных вод. Наиболее схожими характеристиками обладают грядово-мочажинные комплексы, но при детальном сравнении становится очевидной тенденция к уменьшению выноса сульфатов при увеличении выноса фосфатов, что является их отличительной гидрохимической особенностью.

Несмотря на ботаническое сходство типичных рямов и РММК, для последних характерна низкая доля неорганической фракции в составе болотных вод, при этом отмечается возрастание содержания ионов NH_4^+ и PO_4^{3-} . Это делает экосистему более схожей с обводнёнными территориями болот, но в рассматриваемом случае для неё свойственна повышенная концентрация органического углерода.

Наиболее увлажнёнными участками олиготрофного болота являются проточные открытые болота, для которых характерны низкие концентрации растворенного органического вещества относительно других экосистем. Гидрохимической особенностью экосистемы является относительно повышенное содержание K^+ , что может объясняться низкими темпами биологического потребления в анаэробных условиях [Stepanova, Pokrovsky, 2011].

Взаимосвязь РОУ и электропроводности объясняется значительным превышением концентрации РОУ по отношению к неорганическим компонентам в гидрохимической системе болот. Учитывая длительные засушливые периоды и высокие температуры во время отбора проб (средняя температура июля $+19,7^\circ\text{C}$), высокая сходимостъ компонентов SO_4^{2-} и NO_3^- с РОУ может быть объяснена повышенными темпами минерализации amino- и сульфатсодержащих органических соединений [Updegraff et al., 1995]. Однако нахождение оси иона аммония на отдалении относительно рассматриваемых компонент противоречит процессу минерализации органических соединений, содержащих азот [van der Perk, 2006]. Допускается внесение рассматриваемых ионов из атмосферы [Smolyakov, 2000].

Противоположное направление осей индекса SUVA_{254} и ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} объясняется меньшей степенью гумификации РОУ и снижением его сорбционной ёмкости по отношению к упомянутым ионам в условиях повышенного pH относительно других участков болота [Volkov, 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были исследованы гидрохимические характеристики болотных вод, отобранных в типичных фитоценозах верхового болота. Основной целью работы являлось выявление особенностей формирования химического состава воды в пределах различных болотных экосистем. Обнаруженные особенности состава болотных вод чаще связаны с глубиной залегания вод.

Характерной особенностью вод экосистем с низким УБВ (типичный рям, РММК) является высокая концентрация РОУ относительно других участков. Внутригрупповое разделение более сухих участков происходит относительно высоких или низких концентраций неорганических соединений. Так, РММК отличается переходным статусом между участками типичного рья и ГМК – содержание РОУ имеет высокие значения, в то время как ионный состав схож с более обводнёнными участками. Наиболее обводнённые участки (открытое болото, ГМК) чаще

характеризуются низким содержанием неорганических соединений. При этом в водах открытого болота характерно значительное растворение соединений K^+ из отмерших растительных остатков.

Показатель содержания РОУ взаимосвязан с pH и ЕС, что объясняется его преобладанием в гидрохимической системе и формированием основных условий среды. Выраженным отличием более сухих экосистем является высокий индекс $SUVA_{254}$, что вызвано ускоренными темпами разложения высокомолекулярных соединений в условиях повышенной аэрации торфа.

Пространственный анализ описывает 44% детерминации состава проб в первых двух поколениях. Первая компонента описывает основные гидрохимические характеристики олиготрофных болот (pH, ЕС, РОУ). Нагрузка ионов SO_4^{2-} и NO_3^- на данную ось объясняется влиянием осадков на состав болотной воды. Вторая компонента описывает предрасположенность рассматриваемых экосистем к изменениям в ионном составе воды. Наибольшей сходимостью с данной группой обладают рямы и открытые болота. В первом случае это объясняется наличием менее устойчивых к деградации высших автотрофов и ускоренными темпами деградации отмерших растительных остатков в условиях высокой аэрации торфа. Предрасположенность участков открытых болот к осям минеральных соединений объясняется низким биологическим потреблением микроэлементов в анаэробных условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 25-27-00272 «Вынос растворенного органического вещества и сопряженных с ним микроэлементов из верхового болота, его трансформация в гидрологическом континууме».

APPENDIX

ГМК		Открытое болото		Типичный рям		РММК	
№ ПП	Участок	№ ПП	Участок	№ ПП	Участок	№ ПП	Участок
1.1-1.4, 3.1-3.6, 6.6-6.10	Мочажина	4.1, 4.3, 4.6, 5.3, 5.4, 5.6	Межкочье (небольшая мочажина)	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	Кочка (повыше- ние)	10.1-10.5, 11.1-11.5, 12.6-12.10	Мочажи- на
2.7, 3.4, 3.9, 3.13, 6.4, 6.12	Межкочье	4.2, 4.4, 4.5, 4.7, 4.8, 5.1, 5.2, 5.5, 5.7, 5.8	Кочка	7.5, 7.7, 8.1, 8.3, 8.6, 9.1, 9.5	Межкочье (пониже- ние)	12.5, 12.11, 12.13	Меж- кочье
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	Кочка	-	-	-	-	12.1-12.4, 12.12	Кочка

Таблица П1. Типы растительных сообществ.

Table П1. Types of vegetation communities.

Экосистема		ГМК	ГМТК	Открытое болото	РММК	Типичный рям
pH	max	3,7	3,71	3,64	3,58	3,55
	min	3,3	3,28	3,47	3,19	3,11
EC	max	80	83	76	123	141
	min	47	67	42	63	74
DOC	max	105,5	106,09	86,56	134,02	103,68
	min	50,95	55,69	53,74	68,83	59,0
Na	max	2,11	2,02	1,26	1,15	3,74
	min	0,26	0,35	0,14	0,22	0,32
NH ₄	max	0,67	0,66	0,46	0,42	0,77
	min	0,04	0,06	0,09	0,03	0,01
K	max	2,2	2,48	2,21	1,24	2,38
	min	0,21	0,25	0,39	0,12	0,51
Mg	max	0,42	0,49	0,45	0,48	0,43
	min	0,09	0,08	0	0,11	0,08
Ca	max	0,66	0,21	0,94	0,79	0,18
	min	0,17	0,12	0,17	0,15	0,76
Cl	max	4,89	4,5	2,26	1,77	7,39
	min	0,27	0,1	0,28	0,27	0,27
NO ₃	max	0,02	0,04	0,01	0,03	0,06
	min	0	0	0	0	0
PO ₄	max	0,71	0,82	0,77	0,77	0,7
	min	0	0	0	0	0
SO ₄	max	0,29	0,98	0,29	0,14	1,1
	min	0	0	0	0	0,1

Таблица П2. Гидрохимические характеристики болотных экосистем, мг/л.
Table П2. Hydrochemical characteristics of bog ecosystems, mg/l.

ЛИТЕРАТУРА

- Bourbonniere R.A. 2009. Review of water chemistry research in natural and disturbed peatlands. *Canadian Water Resources Journal*, 34(4): 393-414.
- Dyukarev E., et al. 2021. The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia: The Mukhrino bog case study. *Land*, 10(8): 824.
- Filippov I.V., Lapshina E.D. 2008. Types of mire microlandscapes in lake-mire systems of the Middle Ob region. *Dynamics of the Environment and Global Climate Change*, 1(S1): 115-124.
- Hartsock J.A., et al. 2021. A comparison of plant communities and water chemistry at Sandhill Wetland to natural Albertan peatlands and marshes. *Ecological Engineering*, 169: 106313.
- Ivanov K.E. 1953. *Hydrology of Mires*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoe Izdatelstvo.
- Ivanov K.E., Novikov S.M. 1976. *Bogs of Western Siberia: Their structure and hydrological regime*. Leningrad: Nauka.
- Leenheer J.A., Croue J.P. 2003. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter. *Environmental science & technology*, 37(1): 18A-26A pp.
- Maćkiewicz A., Ratajczak W. 1993. Principal components analysis (PCA). *Computers & Geosciences*, 19(3): 303-342.
- Minaeva T.Yu., Sirin A.A. 2011. Biological diversity of mires and climate change. *Advances in Modern Biology*, 131(4): 393-406.
- Potapova T.M., Novikov S.M. 2006. Assessment of anthropogenic changes in the chemical composition of mire waters and dissolved substance runoff from natural and reclaimed raised bogs. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Nauki o Zemle*, (2): 85-95.
- Preis Yu.I., Bobrov V.A., Sorokovenko O.R. 2010. Features of modern mineral matter accumulation in oligotrophic mires of the southern forest zone in Western Siberia. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, (336): 204-210.
- R Core Team. 2020. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. URL: <https://www.r-project.org/>
- Rudolph H., & Samland J. 1985. Occurrence and metabolism of Sphagnum acid in the cell walls of bryophytes. *Phytochemistry*, 24: 745-749.
- Savichev O.G., et al. 2016. Hydrogeochemical conditions of oligotrophic mire ecosystem formation. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, (5): 60-69.
- Smolyakov B.S. 2000. The problem of acid deposition in the north of Western Siberia. *Siberian Ecological Journal*, 1: 21-30.
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S. 2011. Major element composition of peat in convex raised bogs of the middle taiga in Western Siberia (a case study of the Mukhrino bog complex). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, (352): 211-214.
- Tahvanainen T., et al. 2002. Spatial variation of mire surface water chemistry and vegetation in northeastern Finland. *Annales Botanici Fennici*, 235-251.
- Terentyeva I.E., et al. 2021. Mapping taiga mires in Western Siberia using remote sensing data. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 84(6): 920-930.
- Updegraff K., et al. 1995. Environmental and substrate controls over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands. *Ecological Applications*, 5(1): 151-163.
- Volkov I.V. Reactions of trace elements with humic acids as the basis for sorption decontamination and purification of man-made waste: dissertation for the degree of Candidate of Chemical Sciences: 02.00. 04 : dis. B. I., 2016.
- van der Perk M. 2006. *Data and Error Analysis*. London: Taylor and Francis Group.
- Weishaar, J., et al. 2003. Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon. *Environmental Science & Technology*, 37(20): 4702-4708. DOI: 10.1021/es030360x
- Wickham H. 2009. plyr: Tools for splitting, applying and combining data. R package version 0.1.9.
- Wickham H. 2016. Data Analysis. In: ggplot2. Use R! Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-24277-4_9
- Zarov E.A., et al. 2022. Water table and dissolved organic carbon seasonal dynamic at the different ecosystems of the ombrotrophic bog (Mukhrino, West Siberia). *Smart and Sustainable Cities Conference*, 169-180.

Поступила в редакцию: 01.12.2024
 Переработанный вариант: 03.07.2025
 Принято в печать: 04.07.2025
 Опубликовано: 23.07.2025

DYNAMICS OF CARBON STOCK IN THE STAND OF *PINETUM ANDROMEDO-ERIPHOROSO-SPHAGNUM* OVER 50 YEARS UNDER EXTENSIVE DRAINAGE IN THE CONDITIONS OF THE SUBTAIGA OF EUROPEAN RUSSIA (WEST DVINA PEATLAND-FOREST STATION)

Egorov A.A. *, Glukhova T.V., Shirokovskaya A.A.

Институт лесоведения Российской академии наук, Успенское Московской обл.

*egorovfta@yandex.ru

Citation: Egorov A.A., Glukhova T.V., Shirokovskaya A.A. 2025. Dynamics of carbon stock in the stand of *Pinetum Andromedo-Eriophoroso-Sphagnum* over 50 years under extensive drainage in the conditions of the subtaiga of European Russia (West Dvina Peatland-Forest Station). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(2): 81-90.

DOI: 10.18822/edgcc642413

АННОТАЦИЯ

В 1972-1973 гг. на территории Западнодвинского лесоболотного стационара Института лесоведения РАН в Тверской области проводилось масштабное осушение торфяных земель в целях ведения эффективного лесного хозяйства [Biogeocenological ..., 1982]. В 1974 г. в *Сосняке андромедо-пушицево-сфагновом* на верховом болоте в середине межканавья была заложена постоянная пробная площадь. Повторные обследования этой пробной площади проводились в 1983 и 2023 гг. Степень осушения, соответствующая расположению пробной площади в середине 106-метрового межканавья, относится к экстенсивной.

Экстенсивное осушение Сосняка андромедо-пушицево-сфагнового Vб класса бонитета показало, что через 10 лет после осушения сформировался более продуктивный сосняк Vб бонитета, а через 50 лет – *Сосняк багульниково-сфагновый осушенный* Va бонитета. На основе таксационных данных был вычислен запас древостоя за три года наблюдений (1974, 1983, 2023), который составил 14.3, 24.4 и 50.0 м³/га соответственно. Для перевода запасов древостоя в запасы углерода в фитомассе древостоя (ствол, ветви, листва, корни) использовали конверсионный коэффициент, который в соответствии с методическими указаниями оказался равным 0.314. Анализ запасов углерода показал, что он через 10 лет увеличился в 1.7 раза, а через 50 лет – в 3.5 раза. Регрессионный анализ этих данных показал линейную зависимость запаса углерода (C) от возраста экстенсивного осушения за 50-летний период. Коэффициент детерминации (R²) регрессионного линейного уравнения высокий, однако уравнение недостоверно (p-value (F) > α).

За 50-летний период осушения средний ежегодный прирост по запасу древостоя составил 0.71 м³/га, а средний ежегодный прирост запаса углерода фитомассы древостоя – 0.24 т/га. Анализ литературы по осушенным болотным соснякам V-Vб бонитета показал, что запас древостоя в зависимости от давности осушения в целом может увеличиваться, реже – уменьшаться.

Ключевые слова: запасы растущего древостоя, запасы углерода, болотный лес, верховой торф, осушение.

ABSTRACT

In 1972-1973, large-scale drainage of peat lands for the purposes of effective forestry was carried out on the territory of the West Dvina Peatland-Forest Station of the Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences in the Tver Region [Biogeocenological ..., 1982]. Here, in the conditions of the subtaiga of European Russia, swamp forests, bog moss forest and swamps are common, formed on different types of peat – from eutrophic to oligotrophic.

In 1974, a permanent sample plot was laid in the *Pinetum andromedo-eriphoroso-sphagnosum* on the oligotrophic bog. Repeated surveys of this sample plot were conducted in 1983 and 2023. The sample plot (SP) has the number 5-74, has an area of 0.36 ha and a rectangular shape of 36×100 m² (Fig. 1). The long side of the SP is located parallel to the drainage ditches 35 m from them. The distance between the ditches is 106 m. The depth of the peat is about 4 m. The drainage regime corresponding to the location of SP 5-74 in the middle of the 106-meter channel is considered extensive.

The peat soil was characterized by the constancy of the botanical composition of peat-forming agents up to 3.5 m and was represented by the upper magellanicum peat (*Sphagnum magellanicum* Brid.) with a degree of decomposition of 5-25%, deeper – sphagnum transition (*Sph. girgensohnii* Russ.) with a decomposition rate of up to 30%. The carbon content in peat is 48-50%, the pH does not exceed 3.0, the ash content is 2-5%. High peat soil is characterized by a low volume mass (density): from 0.046 in the upper layers to 0.090 g/cm³ in the lower ones [Glukhova, 1990].

In 1974 SP 5-74 was laid in the *Pinetum andromedo-eriphoros-sphagnosum*, which was characterized by Vb class of productivity and V class of age. In 1983, a more productive pine forest of the same V class of age was formed at this place, but still belonging to the Vb class of productivity: compare table 1 for 1983 $M = 24.4 \text{ m}^3/\text{ha}$, and for 1974 $M = 14.3 \text{ m}^3/\text{ha}$. In 2023, the *Pinetum ledoso-sphagnosum drained* of the Va class of productivity and V class of age with $M = 50.0 \text{ m}^3/\text{ha}$ was already described at this site. The taxational characteristics of the stand by year and layer are given in table 1.

Extensive drainage of *Pinetum andromedo-eriphoros-sphagnosum* with Vb productivity class showed that 10 years after drainage, a more productive pine forest was formed, and 50 years later – *Pinetum ledoso-sphagnosum drained* with Va productivity class. Based on the taxation data, the stock of stand was calculated for three years of observations (1974, 1983, 2023), which amounted to 14.3, 24.4 and 50.0 m^3/ha , respectively. To convert stand stocks into carbon stocks in the phytomass of a stand (trunk, branches, foliage, roots), a conversion coefficient was used, which, in accordance with the methodological guidelines [On approval ..., 2022] turned out to be 0.314. The analysis of carbon stocks showed that it increased 1.7 times in 10 years, and 3.5 times in 50 years.

Regression analysis of these data showed a linear dependence of the carbon stock (C) on the age of extensive drainage (A_{drain}) over a 50-year period (Fig. 2):

$$C = 0.2322 \times A_{\text{drain}} + 5.0116, \text{ t/ha,}$$

where $R^2 = 0.99$; p-value (F) = 0.064 for $\alpha = 0.05$.

The coefficient of determination (R^2) of the regression linear equation is high, but the equation is not reliable (p-value (F) > α). In the future, these data can be replenished by analyzing the increments of model trees or mathematical modeling.

Over the 50-year drainage period, the average annual increase in the stock of the stand was 0.71 m^3/ha and the average annual increase in the carbon stock of the phytomass of the stand was 0.24 t/ha. An analysis of the literature on drained bog pine forests of the V-Vb bonitet showed that the stock of stands, depending on the age of drainage, may generally increase, less often decrease.

Keywords: stocks of growing stands, carbon stocks, bog forest, riding peat, drainage.

ВВЕДЕНИЕ

Осушение болот в России проводилось для нужд сельского и лесного хозяйства, а также для добычи торфа. Основная площадь осушения затронула европейскую часть страны и частично юг Западной Сибири и Дальнего Востока [Sirin, 2022]. Осушение земель сопровождается выделением парниковых газов, причем наиболее сильная их потеря происходит при добыче торфа [Suvorov et al., 2010, 2015; Chistotin, 2016; Sirin, 2022; Sirin, Suvorov, 2022]. При этом потери углерода за счёт разложения осушенного торфа при его интенсивной добыче могут составлять более 10% [Suvorov et al., 2015; Sirin, 2022]. Меньшие потери углерода происходят при осушении болотных лесов, что связано с меньшей интенсивностью осушения и увеличением продуктивности древостоя [Sirin, 2022]. В то же время эмиссия метана через осушительные каналы даже при их небольшой доле от площади осушения может быть существенной [Sirin et al., 2012]. Моделирование на примере осушенных болотных лесов в Финляндии показывает, что осушение в конечном счёте приводит к снижению эмиссии парниковых газов [Minkinen et al., 2002]. Несмотря на некоторую противоречивость информации о роли осушенных болотных лесов в поглощении парниковых газов, древесный ярус однозначно выступает как элемент секвестрации углерода. Для выявления роли осушения на потоки парниковых газов необходимо проводить многолетние исследования на одних и тех же пробных площадях.

В этой статье мы рассмотрим динамику запасов углерода в древостое *Сосняка андромедо-пушицево-сфагнового* за 50 лет при экстенсивном осушении в условиях подтайги европейской России на осушенном верховом торфянике, расположенном на территории Западнодвинского лесоболотного стационара Института лесоведения РАН в Тверской области.

Западнодвинский лесоболотный стационар был создан для разработки практических рекомендаций по ведению лесного хозяйства на болотных землях. Здесь в условиях подтайги Европейской России распространены болотные леса и болота, сформированные на разных типах торфа – от низинного до верхового. В 1972-1973 гг. на территории проводилось масштабное осушение торфяных земель в целях ведения эффективного лесного хозяйства [Biogeocenological ..., 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 [Biogeocenological ..., 1982: таблица 7 и таблица 18] (Рис. 1). Повторные обследования этой ПП проводились в 1983 и

2023 г. За 1974 г. имеются результаты таксационного обследования растущего древостоя [Biogeocenological ..., 1982]. За 1983 г. имеются первичные таксационные описания древостоя, хранящиеся в архиве Западнодвинского лесоболотного стационара Института лесоведения РАН. Современные таксационные исследования этой ПП были проведены спустя несколько десятилетий – в 2023 г. в рамках проекта важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» [Егоров, Глухова, 2024].

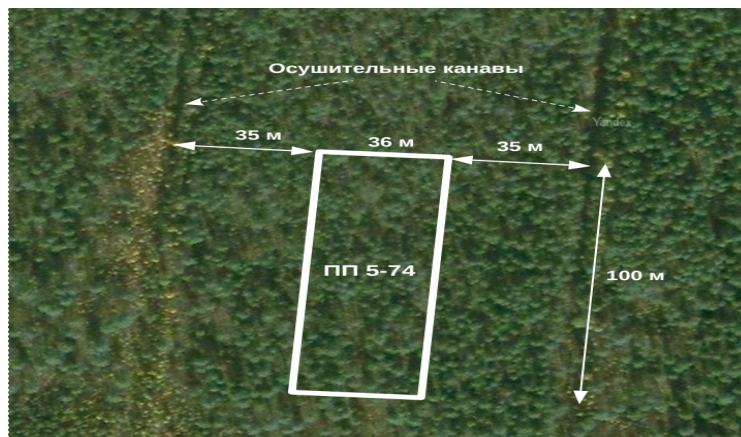


Рис. 1. Расположение ПП 5-74 на верховом торфе в середине межканавы на Западнодвинском лесоболотном стационаре ИЛАН РАН.

Fig. 1. Location of SP 5-74 on the oligotrophic peat in the middle of the inter-channel at the West Dvina Peatland-Forest Station of the Institute of Forest Science of the RAS.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ПП 5-74 имеет координаты центра N 56.15464, E 32.16945, её площадь составляет 0.36 га и имеет прямоугольную форму 36×100 м². Длинная сторона ПП располагается параллельно осушительным канавам в 35 м от них. Расстояние между канавами составляет 106 м. Мощность торфа около 4 м. Режим осушения средней части межканавы, в которой располагается ПП 5-74, относится к экстенсивному.

Торфяная почва характеризовалась постоянством ботанического состава торфообразователей до 3.5 м и была представлена верховым магелланикум-торфом (*Sphagnum magellanicum* Brid.) со степенью разложения 5-25%, глубже – сфагновым переходным (*Sph. girgensonii* Russ.) со степенью разложения до 30%. Содержание углерода в торфах 48-50%, pH_{сол} не превышает 3.0, зольность составляет 2-5%. Для верховой торфяной почвы характерна низкая объемная масса (плотность): от 0.046 в верхних слоях до 0.090 г/см³ – в нижних [Glukhova, 1990].

Для корректного сравнения таксационные показатели растущего древостоя за прошлые годы наблюдений были уточнены: часть приведенных измерений 3-го яруса за 1974 г. [Biogeocenological ..., 1982: таблица 18] мы отнесли к подросту и поэтому исключили их из дальнейшего анализа. Данные подеревной инвентаризации за 1983 г. были разделены на 3 яруса и подрост. При инвентаризации 2023 г. была использована методика, разработанная в Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН [On the approval ..., 2023]. В результате в 2023 г. были выделены два яруса в древостое. Данные за 2023 г. приведены в Приложении. Имеющиеся данные по древесному ярусу были приведены к следующим показателям: средний возраст (A_{cp}), класс возраста; средняя высота (H_{cp}), м; средний диаметр (D_{cp}), см; запас (M), м³/га. Вычисление средних таксационных показателей в целом для древостоя и по ярусам проводилось как взвешенное через сумму площадей сечения (A_{cp} , H_{cp} , D_{cp} за 1983 и A_{cp} , D_{cp} за 1974 и 2023 гг.) и запасы (для H_{cp} за 1974 и 2023 гг.). Более подробно методические аспекты исследования приведены в работе А.А. Егорова и Т.В. Глуховой [2024].

Расчет запасов углерода в древостое (C_{dp}) по годам осушения проводился с применением конверсионных коэффициентов (K), рекомендованных в методических указаниях Минприроды РФ [On approval ..., 2022: таблица 24.4]. Расчет осуществляется по формуле:

$$C_{dp} = K \times M, \text{ т/га.}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 1974 г. ПП 5-74 закладывалась в *Сосняке андромедо-пушицево-сфагновом*, который характеризовался Vб классом бонитета в возрасте 86 лет [Egorov, Glukhova, 2024]. В 1983 г. на этом месте формируется более продуктивный сосняк того же V класса возраста, но все еще относящийся к Vб классу бонитета. В 2023 г. на этом месте уже был описан *Сосняк багульниково-сфагновый осушенный* Va класса бонитета и V класса возраста с $M = 50.0 \text{ м}^3/\text{га}$ [Egorov, Glukhova, 2024]. Таксационная характеристика древостоя по годам и ярусам приведена в таблице 1.

Таблица 1. Таксационные показатели и запасы углерода в древостое *Сосняка андромедо-пушицево-сфагнового* за 50 лет при экстенсивном осушении.

Table 1. Taxation indicators and carbon stock in the stand of the *Pinetum andromedo-eriophoroso-sphagnosum* over 50 years with extensive drainage.

Год	Ярус	Класс возраста	Класс бонитета	H_{cp} , м	D_{cp} , см	M , $\text{м}^3/\text{га}$	C_{op} , т/га
1974	1	V	Vб	5.6	9.1	6.7	4.7
	2			4.0	5.1	6.3	
	3			2.7	2.7	1.3	
	Итого					14.3	
1983	1	V	Vб	6.9	10.8	11.9	8.0
	2			4.6	7.1	10.8	
	3			2.9	3.4	1.7	
	Итого					24.4	
2023	1	V	Va	8.3	10.4	44.2	16.5
	2			4.9	5.6	5.8	
	Итого					50.0	

Обозначения показателей приведены в тексте.

Данные за 1974 и 2023 гг. приведены в соответствии с данными [Егоров, Глухова, 2024].

Для перевода запасов древостоя M в запасы углерода в фитомассе древостоя (ствол, ветви, листва, корни) используют конверсионные коэффициенты, которые зависят от породы, возраста спелости и природной зоны и подзоны [On approval ..., 2022: таблица 24.4]. Территория Западновинского лесоболотного стационара расположена в подтайге (хвойно-широколиственные леса), что соответствует зоне 3 – «южная тайга и более южные климатические зоны» [по: On approval ..., 2022: таблица 24.4]. Возраст технической спелости для сосновых насаждений V бонитета составляет 100-120 лет и выше [Анучин, 1960]. Исходя из этого, низкбонитетный сосновый древостой V класса возраста относится к приспевающим. Этим критериям соответствует конверсионный коэффициент, равный 0.314. Таким образом, через запас древостоя был рассчитан запас углерода в древостое (последняя колонка в Табл. 1).

Запас углерода в *Сосняке андромедо-пушицево-сфагновом* до осушения в 1974 г. составлял 4.7 т/га. Через 10 лет, в 1983 г., в результате экстенсивного осушения запас углерода в сосняке составил 8.0 т/га. Через 50 лет после экстенсивного осушения сформировался *Сосняк багульниково-сфагновый осушенный* с запасом углерода 16.5 т/га. Регрессионный анализ этих данных показал линейную зависимость запаса углерода (C_{op}) от возраста экстенсивного осушения ($A_{осуш}$) за 50-летний период (Рис. 2):

$$C_{op} = 0.2322 \times A_{осуш} + 5.0116, \text{ т/га,}$$

где $R^2 = 0.99$; p-value (F) = 0.064 при $\alpha = 0.05$.

Коэффициент детерминации (R^2) регрессионного линейного уравнения высокий, однако уравнение недостоверно (p-value (F) > α). В дальнейшем это уравнение можно уточнить за счет изучения хода роста насаждения на примере модельных деревьев. Но и при таком несовершенстве уравнение показывает линейную тенденцию изменения запаса древостоя в изучаемом сосняке в период осушения до 50 лет.

Используя данные за 50 лет после осушения (Табл. 1), рассчитали за этот период средний ежегодный прирост по запасу древостоя M , который составил $0.71 \text{ м}^3/\text{га}$, и средний ежегодный

прирост запаса углерода насаждения $C_{др}$ – 0.24 т/га. Полученный нами показатель среднего ежегодного прироста древостоя согласуется с оценками для осушенных сосняков, имеющих до осушения Vб бонитет, а после – V-Va, приводимыми в литературе: 0.5-1.0 м³/га [Tarakanov, 2005], < 1 м³/га [Karpechko, Bondarik, 2010: 21].

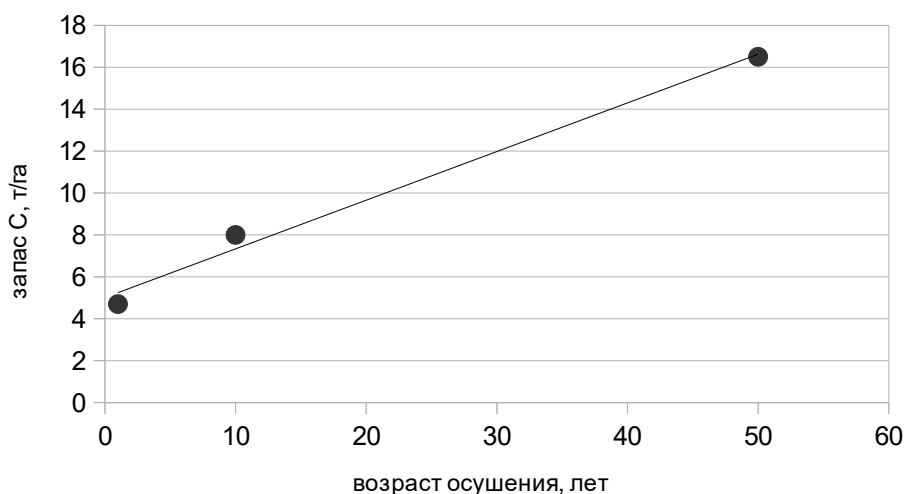


Рис. 2. График зависимости запаса углерода от возраста экстенсивно осушенного *Сосняка андромедо-пушицево-сфагнового* V класса возраста за 50-летний период. Уравнение регрессии приведено в тексте.

Fig. 2. Graph of the dependence of carbon stock on the age of extensively drained of the *Pinetum andromedo-eriophoros-sphagnosum* with V age class over a 50-year period. The regression equation is given in the text.

Анализ данных, приведенных в других исследованиях по динамике продуктивности древостоя после осушения, показал, что «бонитет в осушаемых олиготрофных сосняках может остаться прежним или измениться не более чем на один класс в ту или другую сторону» [Егоров, Глухова, 2024: 622]. И действительно, анализ литературы по динамике запасов древостоя в осушенных болотных сосняках V-Vб бонитета показал, что запас *M* в зависимости от давности осушения может меняться (приводимый ниже класс бонитета в виде одной цифры обозначает, что бонитет до и после осушения не изменился, а два класса бонитета, приведенные через дефис, – первая цифра до осушения, вторая цифра после осушения):

1) увеличиваться (*Сосняк сфагновый* Vб-Va бонитета в северной тайге Приморского района Архангельской обл. [Изотов, 1983]; *Сосняк багульниково-сфагновый* V-IV бонитета в южной тайге Тверской обл. [Ivanov, Bunin, 1986]; болотные сосняки Va бонитета Европейского Севера РФ [Tarakanov, 2004]; сосняк на верховых торфах Va бонитета в Волжско-Камском междуречье [Когеранов, 2006]; сосняк кустарниковый на болоте в средней тайге Ленинградской обл. [Ahti et al., 2011]; *Сосняк кустарничково-сфагновый* и *Сосняк багульниковый* Va бонитетов в южной тайге Зауралья [Solntsev et al., 2014]; *Сосняк сфагновый* V бонитета в северной тайге Коми [Pakhuchij et al., 2019]);

2) уменьшаться (*Сосняк кустарничково-сфагновый* Va бонитета в южной тайге Зауралья [Solntsev et al., 2014]);

3) вначале увеличиваться, а потом уменьшаться, но в целом увеличиваться (*Сосняк багульниково-сфагновый* Va-V бонитета в северной тайге Коми [Pakhuchij et al., 2019]). Вероятно, этот вариант является вариантом первого, т. к. в целом происходит увеличение запаса в зависимости от давности осушения.

Таким образом, как показывает анализ литературы, увеличение запаса древостоя в олиготрофных сосняках вследствие осушения является достаточно закономерным явлением, за редким исключением. Однако прямое сравнение среднего ежегодного прироста изменения запаса от давности осушения с этими данными будет некорректным из-за разной продуктивности сосняков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере осушенного *Сосняка андромедо-пушицево-сфагнового* Vб класса бонитета выявлено, что через 10 лет после осушения сформировался более продуктивный сосняк Vб бонитета, а через 50 лет – *Сосняк багульниково-сфагновый осушенный* Va бонитета с запасами углерода больше в 1.7 и в 3.5 раза соответственно. Изменение запаса древостоя в изучаемом сосняке за 50 лет осушения носит линейный характер. За 50-летний период осушения средний ежегодный прирост по запасу древостоя составил 0.71 м³/га, а средний ежегодный прирост запаса углерода фитомассы древостоя – 0.24 т/га. Анализ литературы по осушенным болотным соснякам V-Vб бонитета показал, что запас древостоя в зависимости от давности осушения в целом может увеличиваться, реже – уменьшаться.

БЛАГОДАРНОСТИ

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».

APPENDIX

№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см
1	2	6,3	87	1	10,1	194	2	7,2	301	1	9,7	393	1	6,7
2	2	5	89	2	5,3	195	2	4,5	303	2	5,3	394	2	7,1
3	2	5,1	90	2	4,8	196	1	8,1	304	1	13,7	395	1	10
4	1	7,1	91	1	9,2	198	1	7,6	306	1	13,9	397	1	7,7
5	1	8,4	92	1	7	200	2	4,2	308	1	15,8	398	1	10,7
6	1	10,7	95	1	16,3	201	2	4,5	312	1	9,5	400	1	8
8	1	9,8	96	1	7,8	204	1	7,8	313	1	13,6	401	1	5
10	1	10,1	98	2	9,1	205	1	8,4	314	1	8,4	402	1	12,5
11	2	4	99	2	4	206	1	7,9	316	2	5,2	404	1	16,5
12	1	9	100	1	8,2	208	1	9,8	317	1	10,7	406	1	13,6
15	1	16,3	104	1	12,3	209	1	7,3	318	2	6,7	408	2	8,5
16	1	15,4	106	2	4,5	212	2	4,2	319	1	8,7	409	1	11
17	1	8,3	107	2	5	213	2	5,8	320	1	14,7	410	2	6,2
19	1	9,8	108	2	5	216	1	10,2	321	1	10,7	411	1	10,3
20	1	6,5	111	2	4,7	218	1	7,5	324	2	4	413	1	12,5
23	1	4,1	112	2	4,2	219	1	8,1	325	2	4,6	414	1	11,5
24	1	8,4	114	1	12,5	220	1	8,6	326	2	5	415	1	13,5
25	1	11,3	116	1	16	221	2	5,6	328	1	13	417	2	6,6
26	1	6	117	1	11,1	222	2	5	330	2	9,8	418	2	8,6
28	1	8,4	119	1	8	224	1	10	331	1	13,5	420	2	5,8
29	1	9	122	1	10	226	2	4,9	332	2	4,7	422	1	9
30	1	7	123	1	5,6	227	2	6,6	333	2	5,4	423	2	7
32	1	10,8	124	1	10	232	1	5,2	336	1	8,3	425	1	14,6
33	1	8,7	127	1	12,6	235	2	4,3	337	2	6,7	426	2	5,6
34	2	4,6	130	1	6,2	236	1	6,7	338	2	6,3	427	1	11,3
35	1	10,3	131	2	4,1	237	1	8,9	339	1	16	429	1	13,1
38	1	17	134	1	7,3	238	2	4,9	342	2	6,3	430	2	5,7
39	1	8,4	136	2	4	241	1	9	343	2	4,5	431	1	12
40	1	7	138	1	8	242	1	12,6	344	2	7	432	1	8,3
42	2	4,2	140	2	8	244	2	5,4	345	1	10	433	2	5,3
45	1	7,3	141	1	7,1	245	1	13,4	346	2	6,6	436	1	18,5
46	1	13	142	1	15,2	250	1	7,3	347	1	14	437	2	6,5
48	1	7	143	2	4,5	251	2	5	350	1	13,6	438	2	5
49	1	5,7	145	2	4,8	253	2	4,7	352	2	6,7	439	1	14,1
50	1	8	150	1	14	254	2	4,1	353	1	10,4	440	1	7
51	1	7,5	151	2	5	256	2	6,3	354	1	13,5	441	1	9
52	1	9	154	2	5,6	257	2	5	355	2	5	443	2	6,2
53	1	13,1	155	1	14	259	2	6	358	1	12,6	445	1	11,2
54	1	11,2	156	2	4	261	1	6,1	359	1	14,5	446	1	11
55	2	4	157	1	6,8	263	2	5,7	360	1	14,5	447	1	9
56	1	6,1	158	1	11,7	265	1	14,6	361	2	6	448	1	8,5
57	1	8,1	159	1	12,2	267	1	8,5	362	1	8,8	452	2	11,5
58	1	8,7	161	2	4,2	270	1	8	363	2	8	453	1	16,5
59	1	15,4	165	1	12,5	273	2	4,3	364	2	5	454	2	5,3
62	1	11	167	2	6,7	274	2	4,6	365	1	9,5	456	2	6
64	1	6,7	169	2	5,3	275	2	7,6	368	1	8,2	458	2	6,2
65	1	10,1	170	1	9,1	276	1	15	369	1	9,6	461	2	7,2
67	2	4,8	171	2	5,6	277	2	4,2	370	1	14	462	1	14,5
70	2	4,7	172	2	5,7	278	1	17	374	1	21	463	1	13,3
72	1	10,3	174	1	8,1	282	1	9	375	1	11	464	2	4,1
73	1	17,3	175	1	10,4	284	2	5	377	1	11	465	1	9,7
74	1	6,3	177	1	6	286	1	12,8	378	1	12	466	1	7
75	2	4,8	178	1	4,6	287	2	4,7	379	2	6,5	467	1	9
77	2	6,6	180	1	7	288	2	4,3	380	2	6	468	1	7,2
78	1	12,3	182	1	11	289	1	10,4	381	1	13,4	470	1	12
79	1	15,3	183	1	11,2	290	1	12,6	384	2	4,7	471	2	4,1
80	2	4,2	184	1	9	293	2	5,6	385	1	12,6	472	1	7,7
82	2	5,3	186	1	10,9	296	2	5,8	389	2	8,1	473	2	5,6
83	2	4	191	2	4,8	297	1	9	390	1	13,6	474	2	4
85	1	11,3	193	1	4,9	300	1	10,7	392	2	6,3	475	2	5

№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см	№	Ярус	d1.3, см
476	2	5,3	568	1	6	659	2	7,2	748	1	6	835	1	5,7
478	2	11	569	1	16	660	1	14,5	749	2	5,4	837	2	8,7
479	1	10,9	570	2	4,5	661	2	5,3	750	1	13	838	1	15,5
480	1	8	572	1	11	663	1	6	752	2	4	839	1	14
481	1	8,5	573	1	9	664	1	6,1	753	2	6,7	840	1	10,1
482	2	6,7	575	1	16	665	2	4,5	754	1	17,7	841	1	14
483	1	10,8	576	2	4,2	666	2	6,4	756	1	10,5	844	1	5,2
484	1	11,6	577	1	14	667	1	13,7	757	1	14	845	2	5,7
485	1	8,1	579	2	8,4	671	1	11,6	758	1	18,7	847	1	6,8
487	1	9,1	580	1	14,1	672	1	8,5	759	1	8,3			
488	1	11,8	582	1	14,5	675	2	5,2	760	2	5			
489	1	15	583	1	6,6	677	1	9,3	761	1	11,7			
490	1	16,2	584	1	12	678	2	4	765	1	18,3			
491	1	10,2	585	1	11,7	679	1	9,7	766	1	13,1			
492	2	5	586	1	8,3	682	2	4,7	771	1	10,2			
493	1	13,3	587	1	6	686	1	9,8	774	1	14,3			
495	2	4,4	588	1	7,1	687	1	9,8	776	2	6,6			
496	1	13,2	589	1	10	689	1	15,5	777	1	8,7			
497	1	9,4	590	1	11,3	690	1	14,3	779	2	4			
498	2	5,7	592	1	10,4	691	1	10,3	781	1	13			
499	1	10,4	595	2	4,8	692	1	12,7	782	2	4,5			
500	2	4,4	596	2	4,3	693	2	8,3	783	1	13,7			
501	1	7,4	597	2	4,2	694	1	12	784	2	8			
502	1	16,5	601	1	14,2	695	1	16,5	785	1	18			
503	1	7	604	1	5,9	696	1	10	786	1	12			
504	1	6	605	2	6	697	1	7	787	2	6,8			
508	2	7	608	1	8,4	698	1	7	788	1	6			
509	1	5,4	609	1	8,8	699	1	15,6	789	1	7			
510	1	10,1	610	1	7	700	1	12,5	790	1	5			
512	1	5,3	611	2	5,5	701	1	11,5	791	1	12	№	Ярус	h, м
515	1	9	612	1	11	702	2	4,5	792	1	15	40	1	6,5
516	1	6,4	613	1	7,2	704	1	12,8	795	1	9	79	1	9
517	1	7,4	615	1	11,3	705	1	4,5	796	2	4	80	2	3,5
519	2	5	619	1	6	706	1	13	797	1	10	119	1	6
521	1	10,4	625	1	9	708	1	17	799	2	4,3	155	1	7
522	1	10	626	1	6	709	1	7,5	801	2	4,3	160	2	3
524	2	5,4	629	1	8,3	710	1	15,5	803	1	10,4	245	1	9
526	1	8,7	630	2	6,1	713	1	12,3	804	2	5	280	2	3
527	2	5,2	631	1	13,3	715	1	11,3	805	1	8,8	320	1	7
528	1	5,2	634	1	8,5	717	1	14,5	806	1	11	360	1	10
530	1	14	635	1	7,7	718	1	9,1	807	1	5,4	400	1	6,5
531	1	7,6	636	1	5,1	720	1	10,4	810	1	5,5	404	1	9,5
533	1	12,5	637	1	7,3	721	1	12,7	811	1	7,6	440	1	7
534	2	4,3	638	1	9,5	722	1	9,4	812	1	9	480	1	8
536	2	5,3	639	1	9,6	723	1	7,8	813	1	8,8	519	2	5
538	2	4,3	640	2	5	725	1	15,3	814	2	7,6	560	1	8,5
539	2	8	641	1	10	729	2	4,9	817	1	5,3	600	2	4
542	1	8,5	642	2	5,6	731	2	4,6	818	1	7,4	601	1	6,5
543	2	5,1	643	1	10,3	732	1	12,3	820	1	7,5	640	2	6
546	1	8	645	2	6	733	1	7,2	821	1	11,9	681	2	4
547	1	11,7	646	1	14,6	735	1	14,3	822	1	13,3	700	1	9
548	2	4,2	647	2	7,2	736	1	8,7	823	1	7,1	720	1	8
549	2	5,3	649	1	7,4	737	1	8,4	824	2	6	725	1	10,5
552	2	6,2	650	1	7,5	738	1	11,5	825	1	12,2	735	1	11
554	2	5,4	652	1	8,2	740	2	7,3	827	1	11,1	760	2	5
558	1	10,7	653	2	6,1	742	2	5,3	828	2	4	774	1	8
560	1	16,8	654	1	8,6	743	2	4,1	829	2	5,6	792	1	11,5
562	1	16	655	2	5,7	744	2	4,3	831	1	6,6	800	2	4,5
563	2	6	656	1	6,2	746	1	15	833	1	6,4	805	1	6,5
565	1	8	657	1	12,1	747	2	5,4	834	1	6	827	1	8,5

Данные таксации растущего С на ПП 5-74 на 2023 г.-2

ЛИТЕРАТУРА

- Anuchin N.P. 1960. *Optimal cutting ages for forests of the European part of the USSR*. Moscow-Leningrad: Goslesbumizdat. 132 p. (in Russian). [Анучин Н.П. 1960. Оптимальные возрасты рубки для лесов Европейской части СССР. М.-Л.: Гослесбумиздат. 132 с.].
- Ahti E., Nousiainen H., Konstantinov V.K., Tihonov S.V. The Finnish experience of 70-year wetland drainage in roshchinsky forestry enterprise, Karelian isthmus. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva*. 2(25): 38-46 (in Russian). [Аhti Э., Ноусийнен Х., Константинов В.К., Тихонов С.В. 2011. Финский опыт 70-летнего осушения болот в Рошинском лесхозе на Карельском перешейке // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. Санкт-Петербург, № 2(25). С. 38-46.].
- Biogeocenological study of swamp forests in connection with experimental hydro-reclamation*. 1982. Nauka, Moscow, 208 p. (in Russian). [Биогеоценологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией. 1982. Москва: Наука. 208 с.].
- Chistotin M.V., Suvorov G.G., Sirin A.A. 2016. The temporal pattern of methane emission from drained peat soil at pot experiment as depended on vegetation and soil moisture. *Agrokhimia*, 12: 20-33 (in Russian). [Чистотин М.В., Суворов Г.Г., Сирин А.А. 2016. Динамика эмиссии метана из осушенной торфяной почвы в зависимости от растительности и режима увлажнения (результаты вегетационного опыта) // Агрохимия. No 12. С. 20-33.].
- Ivanov A.I., Bunin M.A. 1986. Changes in the structure of swamp pine forest stands in the first 10 years after drainage), *Lesovedenie*, 2: 38-44 (in Russian). [Иванов А.И., Бунин М.А. 1986. Изменение структуры древостоев болотных сосняков в первые 10 лет после осушения // Лесоведение, № 2. С. 38-44.].
- Egorov A.A., Glukhova T.V. 2024. Changes in the structure of a stand on a drained oligotrophic swamp for 50 years on West dvina peatland-forest station in Tver oblast. *Lesovedenie*, 6: 617-625 (in Russian). [Егоров А.А., Глухова Т.В. 2024. Изменение структуры древостоя на осушенном олиготрофном болоте за 50 лет на Западнодвинском лесоболотном стационаре в Тверской области // Лесоведение, № 6, с. 617-625]. DOI: 10.31857/S0024114824060036
- Glukhova T.V. 1990. *Chemical composition of soil and groundwater of forest swamps and removal of substances from runoff during hydroforestry*. Abstract of the dissertation of the candidate of Biology sciences. Moscow, 18 p. (in Russian). [Глухова Т.В. 1990. Химический состав почвенно-грунтовых вод лесных болот и вынос веществ со стоком при гидроресомелиорации: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва. 18 с.].
- Izotov V.F. 1983. Changes in the conditions of habitat and growth of North taiga sphagnum pine in connection with drainage. Problems of environmental management in the conditions of the north of the European part of the USSR. Vologda. pp. 46-59 (in Russian). [Изотов В.Ф. 1983. Изменения условий произрастания и роста севернотажного сосняка сфагнового в связи с осушением // Проблемы природопользования в условиях севера европейской части СССР. Вологда. С. 46-59.].
- Karpechko Yu.V., Bondarik N.L. 2010. *The hydrological role of forestry and forestry operations in the taiga zone of the European North of Russia*. Petrozavodsk: Karelian SC RAS. 225 p. (in Russian). [Карпечко Ю.В., Бондарик Н.Л. 2010. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: Кар НЦ РАН, 225 с.].
- Korepanov D.A. 2006. *Forestry efficiency of dehumidification of excessively moistened lands of the Volga-Kama interfluve*. Abstract of the dissertation for the doctor of agricultural sciences. Yekaterinburg. 42 p. (in Russian). [Корепанов Д.А. 2006. Лесоводственная эффективность осушения избыточно увлажненных земель Волжско-Камского междуречья. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук по спец. Екатеринбург. 42 с.].
- Minkinen K., Riitta K., Savolainen I., Laine J. 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900-2100 – the impact of forestry drainage. *Global Change Biology*, 8(8): 785–799. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00504.x
- The methodology of field work on forest taxation on permanent test areas of intensive test sites within the framework of the implementation of an innovative project of national importance "Carbon in ecosystems: monitoring"*, Consortium No. 4 (manuscript). 2003. СЕРП RAS, Moscow (in Russian). [Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях тестовых полигонах интенсивного уровня в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Консорциум № 4 (рукопись). 2023. М.: ЦЭПЛ РАН.].
- On approval of the methodology for quantitative determination of greenhouse gas emissions and greenhouse gas uptake*. 2022. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 05/27/2022 N 371 (in Russian). [Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов. 2022. Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371].
- Pakhuchij V.V., Pakhuchaya L.M., Guber D.V. Dynamics of forest inventory values for pine stands on objects of forest drainage in the Komi Republic. *Actual problems of the forest complex*, 54: 39-42 (in Russian). [Пахучий В.В., Пахучая Л.М., Губер Д.В. 2019. Динамика таксационных показателей сосновых древостоев на объектах гидромелиорации в Республике Коми // Актуальные проблемы лесного комплекса. № 54. С. 39-42.].
- Sirin A.A. 2022. Mires and peatlands: carbon, greenhouse gases, and climate change. *Biology Bulletin Reviews*, 12 (Suppl 2): 123-139. DOI: 10.1134/S2079086422080096 [Сирин А.А. 2022. Болота и антропогенно-измененные торфяники: углерод, парниковые газы, изменение климата // Успехи современной биологии. Т. 142. № 6. С. 560-577.].
- Sirin A.A., Suvorov G.G. 2022. Greenhouse gas emissions from peat extraction in the center of the European part of Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 47 (3): 207-216. [Сирин А.А., Суворов Г.Г. 2022. Эмиссия парниковых газов на торфоразработках в центре Европейской России // Метеорол. гидрол. № 3. С. 68-80.].
- Sirin A.A., Suvorov G.G., Chistotin M.V., Glagolev M.V. 2012. Values of methane emission from drainage ditches. *Environmental dynamics and global climate change*, 3 (2): 1-10 (in Russian). [Сирин А.А., Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Глаголев М.В. 2012. О значениях эмиссии метана из осушительных каналов // Динам. окр. среды глоб. измен. клим. 2012. Т. 3. № 2. С. 1-10.].

Solntcev R.V., Chindyaev A.S., Nagimov Z.Y. 2014. The influence of drainage reclamation on the mode of soil and groundwater and the growth of pine trees by diameter. *Modern Problems of Science and Education*, 5: article 744 (in Russian). [Солнцеv Р.В., Чиндяев А.С., Нагимов З.Я. 2014. Влияние осушительной мелиорации на режим почвенно-грунтовых вод и прирост деревьев сосны по диаметру // Современные проблемы науки и образования, № 5. Статья 744.]. Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A. 2010. Effect of vegetation and moisture conditions on the emission of methane from drained peat soil. *Agrohimia*, 12: 37-45 (in Russian). [Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. 2010. Влияние растительности и режима увлажнения на эмиссию метана из осушенной торфяной почвы // Агрохимия. № 12. С. 37-45.].

Suvorov G.G., Chistotin M.V., Sirin A.A. 2015. The carbon losses from a drained peatland in Moscow oblast used for peat extraction and agriculture. *Agrohimia*, 11: 51-62 (in Russian). [Суворов Г.Г., Чистотин М.В., Сирин А.А. 2015. Потери углерода при добыче торфа и сельскохозяйственном использовании осушенного торфяника в Московской области // Агрохимия. 2015. № 11. С. 51-62.].

Tarakanov A.M. 2004. Growth progress of modal pine and spruce stands on drainage areas of the European North. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*, 5.: 32-4 (in Russian). [Тараканов А.М. 2004. Ход роста модальных сосновых и еловых древостоев на осушаемых землях Европейского Севера // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. № 5. С. 32-42.].

Tarakanov A.M. 2005. Characteristics of amelioration fund and natural peculiarities of bog forests of the European north of Russia. *Arctic Environmental Research*, 2: 56-63 (in Russian). [Тараканов А.М. 2005. Характеристика гидrolесомелиоративного фонда и природные особенности заболоченных лесов Европейского Севера России // Arctic Environmental Research, № 2. С. 56-63.].

Поступила в редакцию: 01.12.2024
Переработанный вариант: 07.07.2025
Принято в печать: 09.07.2025
Опубликована: 23.07.2025

HOW CAN DISCUSSIONS AND RECOMMENDATIONS FROM THE BLUE EARTH PROJECT INFLUENCE POLITICIANS AND VOTERS IN DEMOCRACIES?

Jheeta S.^{1*}, Kotsyurbenko O.R.^{1,2}, Palacios-Pérez M.^{1,3}, Heredia-Barbero A.^{1,4}, de Farias S.^{1,5}, Dominik M.^{1,6}, Chatzitheodoridis E.^{1,7}, McGrath K.¹, Kambham S.L.¹, Safonova M.^{1,8}, Ray D.¹

¹Network of Researchers on the Chemical Emergence of Life (NoRCEL), 1 Leeds, LS7 3RB, UK

²Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

³Theoretical Biology Group, Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México 04510, Mexico

⁴Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México 04510, Mexico

⁵Federal University of Paraíba, Departamento de Biologia Molecular, João Pessoa, PB, Brazil

⁶University of St Andrews, Centre for Exoplanet Science, St Andrews, UK

⁷National Technical University of Athens, Greece

⁸M. P. Bira Institute of Fundamental Research, Bangalore 560001, India

*sohan@sohanjheeta.com

Citation: Jheeta S., Kotsyurbenko O.R., Palacios-Pérez M., Heredia-Barbero A., de Farias S., Dominik M., Chatzitheodoridis E., McGrath K., Kambham S.L., Safonova M., Ray D. 2025. How Can Discussions and Recommendations from the Blue Earth Project Influence Politicians and Voters in Democracies? *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 16(2): 91-94.

DOI: 10.18822/edgcc679189

The Blue Earth Project (BEP), an initiative led by the Network of Researchers on the Chemical Emergence of Life (NoRCEL) convenes global public forums to explore the guiding question: How can discussions and recommendations from the Blue Earth Project influence politicians and voters in democracies? As climate change, biodiversity loss, and ecological degradation intensify, the need for inclusive, ethically grounded scientific discourse has never been greater. This paper outlines the theoretical basis, public value, and democratic relevance of BEP, making the case for its role in supporting evidence-based, citizen-informed policymaking. By integrating perspectives from science, ethics, and public participation, BEP serves as a model for engaging democratic societies in shaping planetary futures.

Keywords: Science-Policy Interface; Environmental Deliberation; Democratic Engagement; Public Participation; Planetary Governance; Ethics of Sustainability

INTRODUCTION

The 21st century is increasingly defined by a convergence of complex and destabilising forces: accelerating environmental degradation, widening socio-economic disparities, rapid technological advancements, and a pervasive erosion of public trust in scientific and political institutions. Climate change, biodiversity loss, and ecosystem collapse are no longer distant projections but present realities, unfolding unevenly across the globe. Simultaneously, digital technologies have transformed how knowledge is created, shared, and contested—often amplifying misinformation and undermining the legitimacy of expert communities. These challenges demand not only scientific innovation but also a fundamental rethinking of how science interfaces with society, policy, and ethical responsibility.

Conventional science-policy frameworks have struggled to keep pace. As Jasanoff (2003) argues, many institutions fail to meaningfully incorporate public values into scientific decision-making. The Blue Earth Project (BEP) responds to this need by fostering inclusive, interdisciplinary forums that bring together researchers, ethicists, youth leaders, indigenous knowledge holders, and

citizens to co-create dialogues around the future of life on Earth. BEP promotes epistemic diversity and ethical reflection, reclaiming science as a public good grounded in participation, inclusivity, and accountability.

The Double-Blind Format of the Blue Earth Project

The BEP, developed by the Network of Researchers on the Chemical Emergence of Life (NoRCEL), employs a distinctive double-blind forum format designed to promote unfiltered intellectual engagement. In this structure, neither the panellists nor the audience are fully informed in advance of the topic to be discussed. This contrasts with conventional scientific conferences, where presentations are typically pre-circulated, rehearsed, or aligned with institutional messaging.

The purpose of this format is to remove the influence of prior preparation, reduce the risk of strategic posturing, and encourage genuine, unscripted dialogue. It fosters a conversational environment in which participants must respond critically and reflectively in real time, drawing on diverse perspectives and lived experiences. By circumventing pre-established narratives or disciplinary boundaries, the double-blind method enhances epistemic spontaneity, transparency, and inclusivity.

Empirical research into interactive and unmoderated science forums has shown that such formats significantly enhance participants' critical reasoning and conceptual depth (Figure 1), while also broadening public trust and engagement. BEP's adoption of this model positions it as a novel contribution to deliberative science communication, particularly in contexts where ethical complexity and democratic legitimacy are at stake.

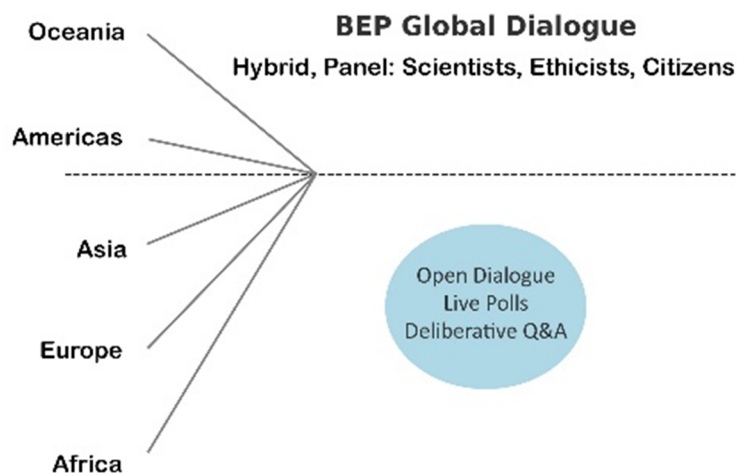


Figure 1. BEP Global Dialogue (Conceptual Illustration): This figure symbolically represents how BEP facilitates global, inclusive scientific dialogue. It shows that participants—from across continents such as Africa, Europe, Asia, the Americas, and Oceania—connect into a hybrid panel composed of scientists, ethicists, and citizens. At the core of the diagram, open dialogue, live polls, and deliberative Q&A are highlighted. These activities are designed to: encourage real-time; unscripted public participation, capture diverse viewpoints; and make scientific discussions more democratic and inclusive. The figure therefore visualises BEP's bottom-up model: science communication that moves beyond expert-driven panels toward global, collective decision-making. It underlines BEP's mission to bridge science, ethics, and public deliberation in addressing planetary challenges.

The Blue Earth Project Forum 2026

BEP provides a public space for critical reflection, inclusive participation, and long-term thinking on humanity's relationship with Earth's biosphere. BEP's participants span continents—Africa, the Americas, Asia, Europe, and Oceania—demonstrating a commitment to global inclusivity. The forum's features include open dialogue, live polls, and deliberative Q&A sessions, enabling

scientists, ethicists, policymakers, and citizens to collaboratively explore and address Earth’s futures and ecological responsibility.

Unlike traditional conferences or expert panels, BEP fosters open-ended deliberation not pre-scripted by institutional agendas. It prioritises cross-disciplinary, intergenerational, and cross-cultural dialogue, especially elevating perspectives, often marginalised in science-policy debates. BEP challenges the norms of top-down communication and promotes participatory engagement where public values shape research priorities and political outcomes.

The Role of Public Deliberation in Environmental Governance

Deliberative democratic theory maintains that well-informed, reflective discussions among diverse publics strengthen the legitimacy of policy outcomes (Dryzek, 2000). Forums such as the Blue Earth Project (BEP) serve as critical bridges between scientific expertise and democratic input. The 2021 OECD report on science engagement emphasises that public forums are more likely to influence policy when participants feel a genuine sense of ownership over the ideas presented. Similarly, Howarth et al. (2020) show that citizen assemblies foster trust in climate policy by grounding debate in widely shared public values.

The BEP forum held in March 2025 exemplified this approach (Figure 2), drawing participation from over 200 delegates—including scientists, ethicists, students, and citizens—from across the globe. Europe and Africa each contributed approximately 45 attendees, while South America accounted for 28. The United Kingdom, listed separately to reflect its distinct engagement, contributed 22 delegates. Strong representation also came from Asia, the Indian Sub-Continent, the Middle East, and North America, each contributing around 15 participants. Oceania, though less represented with 7 attendees, remains an important region for future engagement. This broad distribution underscores BEP’s global reach while also pointing to opportunities for further inclusion of underrepresented communities.

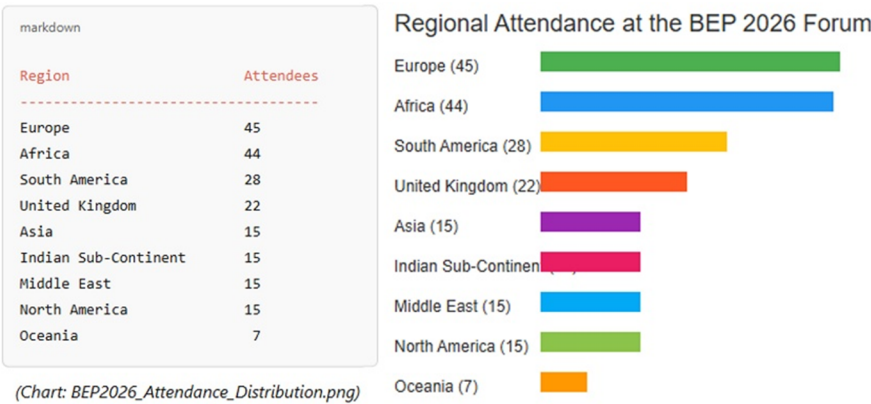


Figure 2. Regional Attendance at the BEP 2026 Forum: This horizontal bar chart shows the distribution of over 200 delegates who attended the Blue Earth Project forum, broken down by region—with the United Kingdom shown separately. Europe and Africa each led with approximately 45 attendees, while the UK alone contributed 22 delegates—a notable turnout considering it represents a single nation. South America followed with 28, and strong participation also coming from Asia, the Indian Sub-Continent, the Middle East, and North America (approximately 15 each), with Oceania contributing 7.

The UK is highlighted independently from the rest of Europe to reflect that NoRCEL, the coordinating body behind BEP, is based in the United Kingdom. This distinction illustrates the central role of the UK in convening and sustaining BEP whilst at the same time showcasing its international reach.

Towards Global Equity in Environmental Dialogue

BEP's commitment to epistemic pluralism ensures that voices from the Global South, Indigenous communities, and youth leaders are integrated into environmental discussions. In doing so, BEP advances the United Nations' Sustainable Development Goals (especially SDG 13: Climate Action and SDG 17: Partnerships for the Goals), while demonstrating that equitable environmentalism must be globally inclusive (UNEP, 2022). In fact, NoRCEL has achieved a total of 7 of 17 UN's SDGs as shown in **Figure 3**.



Figure 3. Alignment of the Blue Earth Project (BEP) with the United Nations Sustainable Development Goals since 2015: This diagram illustrates BEP's integration of key SDG targets into its mission. It highlights BEP's commitment to advancing Quality Education (SDG 4), Gender Equality (SDG 5), Reduced Inequalities (SDG 10), Climate Action (SDG 13), Life Below Water (SDG 14), Life on Land (SDG 15), and Partnerships for the Goals (SDG 17). By embedding these goals into its public forums and initiatives, BEP demonstrates a holistic, interdisciplinary approach to sustainable development and environmental governance.

CONCLUSION AND CALL TO ACTION

The Blue Earth Project offers a timely and vital platform for scientific and civic dialogue on the ecological crises of our time. By encouraging both citizens and policymakers to engage in open, reflective debate, BEP promotes a new model of environmental governance rooted in trust, equity, and ethical reasoning. We invite researchers, policymakers, and the public to engage with BEP's ongoing mission to reimagine a sustainable future for life on Earth.

REFERENCES

- Dryzek J.S. 2000. *Deliberative Democracy and Beyond: Liberals, Critics, Contestations*. Oxford University Press.
- Howarth, C., Painter, J. 2020. Exploring the science-policy interface on climate change: The role of narratives and boundary organizations. *Environmental Science & Policy*, 114, 63–70. DOI: 10.1016/j.envsci.2020.07.021
- Jasanoff, S. 2003. Technologies of humility: Citizen participation in governing science. *Minerva*, 41(3): 223-244.
- OECD 2021. *Science Engagement in Practice: Interactions Between Scientists, Policy Makers and the Public*. OECD Publishing.
- UNEP 2022. *Global Environmental Outlook – Making Peace with Nature*. United Nations Environment Programme.

Поступила в редакцию: 27.04.2025
Переработанный вариант: 14.05.2025
Принято в печать: 01.06.2025
Опубликована: 10.07.2025

Научное издание

ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Том 16, выпуск 2/2025

Цена свободная

16+

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

Дата выхода в свет 23.07.2025

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

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

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

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

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

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

