

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 1, 2026

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Петрозаводск
2026

Главный редактор

А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

А. М. АСХАБОВ, академик РАН, д. г.-м. н., проф.; О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; И. В. ДРОБЫШЕВ, доктор биологии (Швеция – Канада); Э. В. ИВАНТЕР, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; Х. ЙООСТЕН, доктор биологии, проф. (Германия); А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; Е. В. КУДРЯШОВА, д. флс. н., проф.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Н. В. ЛУКИНА, член-корр. РАН, д. б. н., проф.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, академик РАН, д. б. н., проф.; О. ОВАСКАЙНЕН, доктор математики, проф. (Финляндия); О. Н. ПУГАЧЕВ, академик РАН, д. б. н.; С. А. СУББОТИН, доктор биологии (США); Д. А. СУБЕТТО, д. г. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Т. Э. ХАНГ, доктор географии (Эстония); П. ХЁЛЬТТЯ, доктор геологии, проф. (Финляндия); К. ШАЕВСКИЙ, доктор математики, проф. (Польша); В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «Экологические исследования»

К. С. БОБКОВА, д. б. н., проф.; В. В. ВАПИРОВ, д. х. н.; А. Н. ГРОМЦЕВ, д. с.-х. н.; П. И. ДАНИЛОВ, д. б. н., проф.; Н. В. ИЛЬМАСТ (зам. отв. редактора), д. б. н., доцент; Н. М. КАЛИНКИНА, д. б. н.; А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; О. Л. КУЗНЕЦОВ (отв. редактор), д. б. н.; В. А. МАСЛОБОЕВ, д. т. н., проф.; Ф. В. ФЕДОРОВ (отв. секретарь), к. б. н.; С. А. СВЕТОВ, д. г.-м. н.; К. Ф. ТИРРОНЕН, к. б. н.; В. Т. ЯРМИШКО, д. б. н., проф.

Издается с января 2009 г.

Адрес редакции: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Тел. (8142)762018; факс (8142)769600

E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Электронная полнотекстовая версия: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

© ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2026

© Институт биологии КарНЦ РАН, 2026

© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2026

© Институт леса КарНЦ РАН, 2026

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

**of the KARELIAN RESEARCH CENTRE
of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES**

No. 1, 2026

ECOLOGICAL STUDIES

Petrozavodsk
2026

Editor-in-Chief

A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Council

A. M. ASKHABOV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); I. V. DROBYSHEV, PhD (Biol.) (Sweden – Canada); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; T. E. HANG, PhD (Geog.) (Estonia); P. HÖLTTÄ, PhD (Geol.), Prof. (Finland); E. V. IVANTER, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; H. JOOSTEN, Dr. (Biol.), Prof. (Germany); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); E. V. KUDRYASHOVA, DSc (Phil.), Prof.; O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); N. V. LUKINA, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.; V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; O. OVASKAINEN, PhD (Math.), Prof. (Finland); O. N. PUGACHYOV, RAS Academician, DSc (Biol.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SUBBOTIN, PhD (Biol.) (USA); D. A. SUBETTO, DSc (Geog.); K. SZAJEWSKI, PhD (Math.), Prof. (Poland); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the Experimental «Ecological Studies» Series

K. S. BOBKOVA, DSc (Biol.), Prof.; P. I. DANILOV, DSc (Biol.), Prof.; A. N. GROMTSEV, DSc (Agr.); N. V. ILMAST (Deputy Editor-in-Charge), DSc (Biol.), Assistant Prof.; N. M. KALINKINA, DSc (Biol.); A. M. KRYSHEN', DSc (Biol.); O. L. KUZNETSOV (Editor-in-Charge), DSc (Biol.); V. A. MASLOBOEV, DSc (Tech.), Prof.; F. V. FYODOROV (Executive Secretary), PhD (Biol.); S. A. SVETOV, DSc (Geol.-Miner.); K. F. TIRRONEN, PhD (Biol.); V. V. VAPIROV, DSc (Chem.); V. T. YARMISHKO, DSc (Biol.), Prof.

Published since January 2009

Monthly

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
Tel. (8142)762018; fax (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru

Full-text electronic version: <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

© Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2026
© Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2026
© Forest Research Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2026
© Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2026

УДК 581.54

ВЛИЯНИЕ ДЛИННОГО ПОЛЯРНОГО ДНЯ НА РАСТЕНИЯ: ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

А. А. Рубаева^{1*}, Е. Г. Шерудило¹, Н. Ю. Шмакова², Т. Г. Шibaева¹

¹ Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),
*arubaeva@krc.karelia.ru

² Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина, ФИЦ
«Кольский научный центр РАН» (ул. Ботанический сад, Кировск, Россия, 184256)

В природных условиях продолжительность светового дня значительно варьирует на поверхности Земли и зависит от времени года и широты. Длительность полярного дня в высоких широтах, когда солнце не уходит за горизонт, составляет, например, на Кольском полуострове около 50 дней – с конца мая до середины июля. Кроме того, почти месяц до и после полярного дня наблюдается период белых ночей, когда солнце опускается не более чем на 6–9° ниже линии горизонта, его свет продолжает рассеиваться в атмосфере и поэтому темнота не наступает. Таким образом, растения на протяжении более трех месяцев оказываются в условиях круглосуточного освещения. В статье кратко обобщены материалы из архивных научных отчетов и публикаций ученых Полярно-альпийского ботанического сада-института (67°38' с. ш.) – самого северного и единственного ботанического сада в полярных широтах в России, а также сотрудников других научных учреждений, проводивших свои исследования в Заполярье с целью изучения феноменологии и механизмов адаптации культурных и диких видов растений к экстремальным световым режимам Крайнего Севера.

Ключевые слова: адаптация; круглосуточное освещение; полярный день; растения

Для цитирования: Рубаева А. А., Шерудило Е. Г., Шмакова Н. Ю., Шibaева Т. Г. Влияние длинного полярного дня на растения: история изучения и результаты // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 5–17. doi: 10.17076/esc2255

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0004) и КНЦ РАН (FMEZ-2024-0012).

A. A. Rubaeva^{1*}, E. G. Sherudilo¹, N. Yu. Shmakova², T. G. Shibaeva¹.
THE IMPACT OF LONG POLAR DAYS ON PLANTS: RESEARCH HISTORY
AND RESULTS

¹*Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *arubaeva@krc.karelia.ru*

²*Polar-Alpine Botanical Garden – Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences (Botanichesky Sad St., 184256 Kirovsk, Murmansk Region, Russia)*

Under natural conditions, daylight duration varies considerably around the globe and depends on season and latitude. High latitudes have the polar day period, when the Sun does not set below the horizon. On the Kola Peninsula, e.g., it lasts about 50 days, from the end of May to mid-July. Moreover, at these latitudes the period when civil twilight lasts all night (known as the white night) starts almost a month before the beginning of the polar day and continues for another month after it. During this time, the Sun does not sink low below the horizon and there is no darkness. As a result, plants in this region are exposed to continuous lighting for more than 3 months. The article summarizes and presents materials collected from archives, scientific reports and publications of researchers from the Polar-Alpine Botanical Garden (N67°38') and other institutions who conducted research in the Arctic, studying the phenomenology and mechanisms of adaptation of crops and wild plants to the extreme light conditions of the High North.

Keywords: adaptation; continuous lighting; plant; polar day

For citation: Rubaeva A. A., Sherudilo E. G., Shmakova N. Yu., Shibaeva T. G. The impact of long polar days on plants: research history and results. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 5–17. doi: 10.17076/eco2255

Funding. This study was funded from the federal budget through state assignments to the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, FMEN-2022-0004, and Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, FMEZ-2024-0012.

Введение

Проведение интродукционных исследований и осуществление на их основе интродукции новых культур в условиях Субарктики является одним из подходов к решению задач продовольственной безопасности, озеленения и сохранения биоразнообразия в высокоширотных регионах. Такие исследования позволяют оценить перспективность хозяйственного использования интродуцентов и выявить их устойчивость к абиотическим и биотическим стрессорам. Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН (ПАБСИ КНЦ РАН) – самый северный и единственный в полярных широтах ботанический сад в России, входит в группу трех ботанических садов в мире, расположенных за полярным кругом. Изучение растений на территории ботанического сада ведется на протяжении почти 95 лет. Всего в результате интродукционных исследований коллекционный фонд арктической флоры пополнился более чем 1000 видами травянистых и 250 видами древесных растений. Полярно-альпийский ботанический сад (ПАБС) стал одной из первых

научных организаций, изучавших растительные организмы в условиях Крайнего Севера (рис. 1). Работы проводились с целью изучения феноменологии и механизмов адаптации растений к экстремальным условиям высоких широт: короткий вегетационный период (в среднем с начала июня до середины сентября), низкая температура воздуха и почвы, полярный день. В этот период растения на протяжении более трех месяцев оказываются в условиях непрерывного освещения, которые для растений более низких широт абсолютно нетипичны. Кроме того, несмотря на полярный день, растения получают небольшие суммы солнечной радиации малой интенсивности из-за невысокого положения солнца над горизонтом и облачности [Шматок, 1995]. Наиболее активно вопросы влияния длинного полярного дня на растения изучались, судя по архивным данным, в период 1930–1960-х годов.

Целью данного обзора явилось обобщение и представление сведений, полученных из архивных материалов, научных отчетов и публикаций ученых ПАБСИ КНЦ РАН и сотрудников других научных учреждений, проводивших свои исследования в Хибинах в 1930–1960-х годах



Рис. 1. Первый питомник травянистых интродуцентов, 1948 г. (фото из научного архива ФИЦ КНЦ РАН)

Fig. 1. The first nursery of herbaceous introduced species, 1948 (photo from the research archive of the Kola Science Center, Russian Academy of Sciences)

с целью изучения феноменологии и механизмов адаптации культурных и диких видов растений к экстремальным световым режимам Заполярья.

Основание направления исследований ПАБС, связанных с адаптацией растений к экстремальным условиям высоких широт

История ПАБС началась в 1931 г., когда молодой геоботаник Н. А. Аврорин, участник экспедиции академика А. Е. Ферсмана на Кольский полуостров, представил для обсуждения собранию ученых Кольской базы Академии наук СССР проект «Полярно-альпийский ботанический сад в Хибинах». Проект поддержали, и осенью 1931 г. был организован первый в мире ботанический сад за полярным кругом, а Н. А. Аврорин назначен его первым руководителем. Основная территория ПАБС расположена в городе Кировске Мурманской области, на склоне Хибинских гор. В его структуре были предусмотрены подразделения, которые и сегодня составляют основу сада – гербарий, питомники, почвенно-геоботанический отдел, отдел споровых растений, биогеоценологический отдел, парк и музей.

Ученые ботанического сада изучали реакции местных и интродуцированных растений на непрерывный полярный день, когда солнце

совсем не заходит за горизонт в течение почти 50 дней. В этот период в спектральном составе естественной радиации большая доля принадлежит красному и дальнему красному свету. Еще больше (до 100 дней) длится период так называемых белых ночей, когда солнце опускается не более чем на 6–9° ниже линии горизонта, из-за этого его свет продолжает рассеиваться в атмосфере и полная темнота не наступает, а сумерки длятся всего 2–3 ч; его сменяет период ночей без полной темноты – до 160 дней [Будыко, 1956]. Летом, когда солнечный свет падает под меньшим углом, в нем преобладает длинноволновая радиация. В облачную погоду и в условно «ночное» время преобладает коротковолновая радиация. В частности, за счет богатой энергией коротковолновой части солнечного света происходит расширение спектра поглощаемой лучистой энергии и увеличивается количество поглощаемой солнечной энергии [Шахов, 1965]. Кроме того, растения Арктики способны поглощать до 70–80 % желто-зеленых лучей. Это явление известно как спектральная фотоадаптация и оказывает большое влияние на форму растений [Шахов, 1965; Шульгин, 1967; Андреев, 1975].

В задачи исследований входило изучение влияния длинного полярного дня на ритмы роста и развития растений, а также на транспирацию, фотосинтез (рис. 2), химический состав и поглощение минеральных элементов.



Рис. 2. Определение интенсивности фотосинтеза методом ассимиляционной колбы (фото из научного архива ФИЦ КНЦ РАН)

Fig. 2. Determining the rate of photosynthesis by the assimilation flask method (photo from the research archive of the Kola Science Center, Russian Academy of Sciences)

Уже в ранних работах исследователи обратили внимание на феномен полярного дня и его влияние на рост и развитие растений [Аврорин и др., 1964]. Была проведена огромная экспериментальная работа. В течение вегетационного периода постоянно велись фенологические наблюдения. Каждые 10 дней фиксировали прирост растений. В конце вегетационного периода, в сентябре и октябре, проводили подробное описание опытных растений, учитывая и определяя число междоузлий, одревеснение побегов, наличие и отсутствие боковых ветвей, площадь листьев, повреждения от осенних заморозков.

Для того чтобы исключить влияние других факторов среды, исследователи провели серию уникальных опытов путем организации параллельных наблюдений за растениями в естественных условиях полярного дня и в условиях искусственно укороченного дня. Затенение на 8, 10, 12 или 14 ч создавалось накрытием грядок с опытными растениями специально сконструированными фотопериодическими кабинками, которые передвигали по деревянным рельсам. Площадь кабин составляла 6 м², высота в коньке примерно 1 м, изнутри они обивались толем или плотной бумагой. Кабины вставлялись в специальные пазы, что позволяло полностью избежать попадания света на растения через зазоры между почвой и кабинкой [Журбицкий, 1968]. Если растения выращивали в парниках, то их закрывали черной плот-

ной материей [Журбицкий, Вартапетян, 1956]. Искусственное затенение растений проводили в фазу активного роста (в зависимости от вида в июне или июле).

В ходе экспериментов проводили учет накопления и оттока ассимилятов из листьев, анализировали движение растворимых углеводов и элементов минерального питания (методом микрорадиографии с использованием радиоактивного углерода), определяли содержание азота, белка, аскорбиновой кислоты [Каспарова, Усова, 1948; Журбицкий, Вартапетян, 1956; Вартапетян, Онохина, 1962]. Особенности газообмена анализировали методом ассимиляционной колбы (по Л. А. Иванову и Н. Л. Коссович), разработанным в 1934 г.; он позволяет определять интенсивность фотосинтеза и дыхания растений в полевых условиях с помощью герметичного стеклянного сосуда, в который помещают растение.

Итогом многолетних исследований стало выявление наиболее устойчивых растений, прошедших полный цикл развития в экстремальных условиях короткого вегетационного периода и длинного полярного дня на Кольском полуострове, а также были определены перспективные виды для расширения перечня сельскохозяйственных культур и видов для декоративного озеленения. Проведенные исследования заложили научную основу для разработки практических рекомендаций по растениеводству за полярным кругом.

Влияние длинного полярного дня на фотосинтез

В ходе изучения суточной динамики фотосинтеза у растений местной флоры и интродуцентов за полярным кругом в период 1930–1960-х годов были получены достаточно противоречивые результаты. Так, С. П. Костычев с соавт. [1930] сообщали, что фотосинтез при открытых устьицах во время летнего солнцестояния у местных дикорастущих видов идет непрерывно и характеризуется одновершинным суточным ходом с максимумом около полудня и минимумом после полуночи. Суточная продуктивность фотосинтеза достигала высоких значений (до 138 мг $\text{CO}_2/\text{дм}^2$), что авторы объясняли длинной продолжительностью полярного дня [Закман, 1962]. Однако в период с 1938 по 1939 г. Кольская экспедиция отдела экологии Ботанического института (БИН) имени В. Л. Комарова АН СССР провела исследования, которые продемонстрировали прямую зависимость дневного хода фотосинтеза от освещенности и температуры. Одновершинная кривая фотосинтеза наблюдалась только в дни с равномерными условиями, а в период длинного полярного дня процесс фотосинтеза не фиксировался. Дело в том, что ночные часы длинного полярного дня отличаются слабой освещенностью, преобладанием красных длинноволновых лучей и более низкими температурами. Эти условия замедляют фотосинтетические процессы и энергетический обмен, несмотря на достаточную продолжительность освещения [Разумов, Смирнова, 1940]. Позднее ученые обнаружили, что в условиях низких почвенных температур растения поглощают значительно большую долю дальней красной части спектра по сравнению с условиями средней полосы, и предположили, что это может быть связано с компенсацией недостатка тепла, необходимого для их развития [Дадыкин, Григорьева, 1951; Шахов, 1965].

Кроме того, обнаружено, что у интродуцированных растений наблюдается ночной перерыв в фотосинтетической активности, в то время как местные виды демонстрировали круглосуточную ассимиляцию углекислого газа. Предположительно, это обусловлено генетическими различиями, происхождением и эволюцией видов. Данные выводы подкрепляли точку зрения, согласно которой адаптация к новым экологическим условиям и изменение физиологических параметров фотосинтеза являются ключевыми факторами в процессе интродукции растений [Данилов и др., 1948; Дадыкин, Григорьева, 1951].

Максимальная интенсивность фотосинтеза в вегетационный период у большинства изученных видов отмечалась во время полярного дня (июнь–июль), тогда как к концу августа ее значения снижались на 30–50 % из-за уменьшения светового потока и температуры. Некоторые интродуценты (например, люпин многолистный *Lupinus polyphyllus*) демонстрировали высокую пластичность фотосинтетического аппарата, достигая продуктивности, сопоставимой с таковой в умеренных широтах. Однако их устойчивость к зимним условиям была все же ограниченной [Аврорин и др., 1964; Закман, 1969].

В 1957 г. Т. П. Штанько из БИН АН СССР впервые провела исследование фотосинтеза в природных условиях в период полярного дня. Используя радиоактивный метод, она обнаружила, что карликовая береза *Betula nana*, европейская голубика *Vaccinium myrtillus*, брусника *Vaccinium vitis-idaea* и кисличник двустолбчатый *Oxyria digyna* не сохраняют фотосинтетическую активность в «ночные» часы в отличие от растений умеренных широт [Шмакова и др., 2011], тем самым подтвердив данные, полученные ранее другими исследователями.

В результате детального анализа процессов фотосинтеза у ряда культурных и дикорастущих видов растений, произраставших в Хибинах, было установлено, что в условиях длинного полярного дня все исследованные виды обладают способностью к ассимиляции углекислого газа круглосуточно, но в условно «ночные» и пасмурные часы величина ассимиляции очень мала и составляет около 1 мг $\text{CO}_2/\text{дм}^2$ [Кислякова, 1958, 1960].

Изучение фотосинтеза и дыхания у картофеля и пшеницы в условиях полярного дня выявило, что эти растения способны осуществлять фотосинтез даже в ночное время [Каспарова, Усова, 1948; Журбицкий, Вартапетян, 1956]. Установлено, что в указанных условиях у растений формируются специфические физиологические и биохимические адаптации, обеспечивающие более эффективное использование лучистой энергии, и это имеет значение для повышения интенсивности и продуктивности фотосинтеза и более высокой их урожайности [Шахов, 1965].

И. Д. Шматок продолжила исследования фотосинтеза с использованием радиоуглеродного метода, разработанного О. В. Заленским с сотрудниками. Объектами исследования стали как местные растения (черника *Vaccinium myrtillus*, золотарник *Solidago lapponica*, иван-чай *Chamaenerion angustifolium*), так и интродуцированные виды (горец Вейриха

Polygonum weyrichii, бадан толстолистный *Bergenia crassifolia* и тополь душистый *Populus suaveolens*). На основании проведенных исследований автор сделала несколько важных выводов. Во-первых, она отметила, что потенциальный фотосинтез у местных растений (черники и золотарника) ниже, чем у интродуцированных видов (бадана, горца Вейриха и тополя). Во-вторых, наблюдается соответствие, но не пропорциональность, между интенсивностью фотосинтеза и освещенностью. В-третьих, в «ночные» часы полярного дня с ясной погодой фотосинтез также возможен. Наконец, она указала на то, что температурная инверсия в горной тундре может приводить к повышению температуры по сравнению с лесным поясом, а это в свою очередь активизирует работу ассимиляционного аппарата растений и повышает их продуктивность [Шматок, 1962б; Шмакова и др., 2011].

Таким образом, многочисленными исследованиями показано, что в период полярного дня растения способны осуществлять фотосинтез даже в «ночные» часы, хотя доля ночного фотосинтеза составляет всего 4–10 % от суточной ассимиляции. В течение суток продуктивность фотосинтеза растений тундры достигает 100 мг CO₂/дм², в то время как у растений в лесном поясе этот показатель составляет 25–50 мг CO₂/дм². Сезонная динамика ассимиляционной активности растений в Хибинах также имеет свои особенности. Наивысшая ее активность наблюдается в июле и начале августа, что благоприятно влияет на вегетацию растений, так как совпадает с оптимальными температурными условиями воздуха и почвы [Лукьянова и др., 1986].

Влияние длинного полярного дня на рост и продуктивность растений

В ходе многолетних наблюдений за местными арктическими растениями и интродуцентами отмечена значительная вариабельность реакции растений на длинный фотопериод. Так, Г. Э. Шульцем [1949] были проведены трехлетние опыты, в ходе которых изучалась реакция 42 видов древесно-кустарниковых пород и травянистых растений на непрерывный летний день в естественных условиях Заполярья и в условиях искусственно укороченного (16 и 10 ч) дня. Для этого использовали уже упомянутые светонепроницаемые кабинки, которые обеспечивали полную темноту в течение необходимых периодов времени. Результаты исследования показали, что на длинном полярном дне по сравнению с 10-часовым

фотопериодом происходило ускорение развития, на что указывали более интенсивный рост междоузлий и увеличение их количества (например, у желтой акации *Caragana arborescens*) (рис. 3). Растения табака душистого *Nicotiana affinis*, выращенные в условиях полярного дня, также опережали по темпам развития растения, которые были выращены при 10-часовом фотопериоде. Непрерывное освещение на первом году вегетации стимулировало рост пазушных почек и приводило к росту боковых ветвей на молодых побегах раkitника *Chronanthus*, вызывало более раннее и обильное цветение у петунии *Petunia* и курильского чая *Dasiphora fruticosa*. На непрерывном полярном дне был отмечен большой по величине прирост биомассы у гвоздики турецкой



Рис. 3. Влияние продолжительности дня на рост и морфологию трехлетних сеянцев желтой акации *Caragana arborescens*, выращенных в оранжерее: а – длинный день, б – короткий день [по: Шматок, 1956]

Fig. 3. The effect of day length on the growth and morphology of three-year-old yellow acacia *Caragana arborescens* grown in a greenhouse: a – long day, б – short day [Shmatok, 1956]

Dianthus barbatus, рудбекии рассеченной *Rudbeckia laciniata*, никандры физалисовидной *Nicandra physalodes*, нивяника большого *Leucanthemum maximum*, космеи дваждыперистой *Cosmos bipinnatus* и у многих других растений-интродуцентов. У лиственницы сибирской *Larix sibirica* на полярном дне прирост хвои был выше, чем при 10-часовом фотопериоде. Кроме того, в разных вариантах опыта хвоя различалась: на коротком дне она была короче и жестче, на непрерывном – длиннее и мягче [Шульц, 1936; Аврорин и др., 1964].

Изучение древесных пород показало, что их перемещение из одной географической широты в другую, связанное с резким изменением продолжительности освещения, сказывается на их развитии задержкой или ускорением роста, изменением сроков цветения и плодоношения. Помимо всех известных групп короткодневных, нейтральных и длиннодневных растений на основе изучения отношения к длине дня ученые выделили среди древесно-кустарниковых пород Севера и умеренной зоны по характеру их фотопериодической экологии следующие группы [Шульц, 1949]: 1) породы с фотопериодически индетерминированным сезонным развитием, на рост и развитие которых непрерывный полярный день не оказывает существенного влияния. Нормальный ход их сезонного развития при переносе в Субарктику не нарушается. Растения данной группы рекомендованы для интродукции на Крайний Север (например, сирень венгерская *Syringa josikaea*); 2) породы с фотопериодически детерминированным сезонным развитием, у которых непрерывный полярный день отчетливо стимулирует рост и сокращает период активной вегетации растений. У типичных фотопериодически детерминированных пород сезонно-фиксированный переход к осенне-зимнему покою на непрерывном полярном дне невозможен, как, например, у робинии ложноакациевой *Robinia pseudoacacia* и ивы Бебба *Salix bebbiana*. Эти растения не рекомендованы для интродукции на Крайний Север. У светоустойчивых фотопериодически детерминированных пород сезонно-фиксированный переход к осенне-зимнему покою беспрепятственно осуществляется и на непрерывном полярном дне (например, у голубики *Vaccinium uliginosum*).

Что касается влияния полярного дня на зимостойкость растений, то они либо сохраняли ее, как, например, ирга колосистая *Amelanchier spicata* и жимолость татарская *Lonicera tatarica*, либо же не успевали завершить период вегетации и были менее подготовлены к зиме.

Это происходило с ясенем *Fraxinus excelsior*, лохом серебристым *Elaeagnus commutata* и некоторыми другими видами. В итоге выявлены растения, которые непригодны для выращивания в условиях полярного дня и, соответственно, для озеленения на Кольском полуострове (например, чингиль серебристый *Halimodendron argenteum*). Однако в условиях длинного полярного дня некоторые растения, включая ивовые, березовые, камнеломковые, бобовые, клен и липу, продемонстрировали крайне низкую адаптивность к экстремальным зимним температурам. В первую же зиму данные виды подверглись значительному обмерзанию и многие погибли. В целом общей тенденцией для растений-интродуцентов было ускорение роста и более энергичное ветвление на полярном дне. При этом проведенные исследования показали, что количественные и качественные различия растений обусловлены не только более длительным фотопериодом, увеличивающим продолжительность фотосинтетической активности, а являются результатом более глубоких и специфических изменений [Шульц, 1949].

Исследованиями, проведенными на злаковых культурах, установлено, что полярный день, обеспечивающий непрерывную инсоляцию в течение нескольких недель или даже месяцев, оказывает комплексное влияние на физиологию злаков. С одной стороны, удлиненный фотосинтетический период способствует активному накоплению пластических веществ, что может положительно сказываться на продуктивности растений. С другой стороны, нарушение фотопериодических ритмов может приводить к изменению фенологии, включая сроки цветения и созревания зерна [Гончаров, 1987]. Дальнейшие исследования, проведенные в ПАБСИ, подтвердили, что адаптация злаковых культур к условиям Крайнего Севера зависит не только от светового режима, но и от обеспеченности почв минеральными элементами, что было впервые отмечено в работе С. А. Каспаровой и П. Г. Усовой [1948]. В частности, показано, что оптимизация азотного и фосфорного питания позволяет растениям эффективнее использовать длинный световой день для формирования урожая.

Влияние длинного полярного дня на синтез и транспорт органических соединений

Изучение ключевых биохимических и физиологических особенностей арктических и субарктических видов, обеспечивающих их выживание в условиях низких температур, короткого

вегетационного периода и интенсивной солнечной радиации, показало, что в условиях Крайнего Севера растения синтезируют низкомолекулярные органические соединения (сахара, пролин, глицинбетаин), предотвращающие кристаллизацию внутриклеточной воды и стабилизирующие мембранные структуры [Шматок, 1962б]. Наличие таких механизмов позднее подтверждено и в работах на других объектах [Sakai, Larcher, 1987]. У полярных растений наблюдается увеличение доли ненасыщенных жирных кислот в фосфолипидах клеточных мембран, что повышает их текучесть при низких температурах. Этот феномен соответствует современным представлениям о роли десатураз в холодовой адаптации [Los, Murata, 2004].

Интересные результаты получены при исследовании азотистого обмена у растений, происходящих из разных географических зон (черника и кипрей), при их введении в регионы на высоких широтах. Обнаружено, что процессы азотистого обмена тоже имеют суточную ритмичность. Содержание азотистых веществ в листьях увеличивается с утра, достигая максимума в полдень или после полудня, и затем постепенно снижается в вечерние и ночные часы. В течение дня уровень азотистых веществ также уменьшается. В вечернее и ночное время доля белка в общем азоте возрастает. Примечательно, что даже при непрерывном освещении этот ритм не нарушается [Вартапетян, Онохина, 1962].

Определение содержания аскорбиновой кислоты у интродуцированных растений представляло особый интерес, так как позволяло решить спорный вопрос о характере зависимости накопления аскорбиновой кислоты в растениях от географических условий. У растений за полярным кругом сохраняется та же закономерность в распределении аскорбиновой кислоты в листьях, что и у растений этих же семейств, растущих на других территориях. Местные растения сохраняют довольно высокое постоянство в содержании аскорбиновой кислоты при произрастании в разных растительных поясах [Вартапетян, Онохина, 1962]. Установлено, что растения в южных и долинных районах накапливают аскорбиновой кислоты меньше, чем растения в северных и горных районах. Данную закономерность связывают с благоприятным действием низких температур на биосинтез данного вещества и, как следствие этого, повышение устойчивости растений к пониженным температурам. Кроме того, как оказалось, содержание аскорбиновой кислоты зависит от погодных условий (освещенности и влажности).

Ее наибольшее содержание совпадает с фазой активного роста растений и может меняться в течение суток [Шматок, 1962а]. Интенсивная инсоляция в условиях полярного дня приводит к усиленному образованию активных форм кислорода, в ответ на это растения усиливают синтез антиоксидантов (аскорбиновой кислоты, токоферолов, флавоноидов и др.) и повышают активность ферментов антиоксидантной системы [Huang et al., 2019].

Изучение влияния элементов минерального питания на накопление и превращение пластических веществ при созревании зерна показало, что скорость прохождения фаз развития и созревания злаковых культур на Крайнем Севере зависит в значительной степени не только от температуры, но и от светового фактора. Вследствие короткого вегетационного периода и замедленного прохождения фазы «колошение – цветение» в условиях полярного дня у яровой пшеницы формирование и созревание зерновки совпадает с периодом низких температур, что препятствует превращению завязи в плод, наливу и созреванию зерновки. Исследования, проведенные с целью найти возможность повлиять на эту ситуацию с помощью минерального питания, показали, что внесение повышенных, по сравнению с более южными широтами, доз азотных удобрений ускоряет фазы развития яровой пшеницы в полярных районах и тем самым способствует обильному плодоношению [Каспарова, Усова, 1948].

Внимание исследователей было обращено на такую экономически важную культуру, как картофель *Solanum tuberosum*. Изучали влияние специфических факторов высоких широт (длинный полярный день и низкие температуры вегетационного периода) на накопление биомассы и клубнеобразование картофеля. Результаты исследования показали, что у картофеля с. Имандра в условиях полярного дня наблюдалось значительное увеличение вегетативной массы (на 25–40 % по сравнению с 12-часовым фотопериодом), но клубнеобразование задерживалось на 12–18 дней (рис. 4). Имея мощную ботву, растения в августе накапливали большое количество ассимилятов, а общий вес клубней на полярном дне превышал вес клубней на коротком дне. Однако качество урожая было ниже, так как на полярном дне доля мелких клубней была выше и они содержали меньше крахмала [Журбицкий, Вартапетян, 1956].

Корнеплоды моркови *Daucus carota* и свеклы *Beta vulgaris* показали различную реакцию на непрерывный день: если у моркови отмечалось



Рис. 4. Клубнеобразование у *Solanum tuberosum* с. Имандра на полярном дне (слева) и на 12-часовом дне (справа) в возрасте 55 дней [по: Журбицкий, Вартапетян, 1956]

Fig. 4. Tuber formation in *Solanum tuberosum* from the village of Imandra on the polar day (left) and during a 12-hour day (right) at 55 days of age after [Zhurbitskii, Vartapetyan, 1956]

увеличение массы корнеплода на 30–35 %, то у свеклы наблюдалось преимущественное развитие листового аппарата. У капусты белокачанной *Brassica oleracea* var. *capitata* при искусственном удлинении светового дня до 20 часов наблюдалось ускоренное формирование кочана (на 15–20 дней раньше контрольных сроков) [Закман, 1962; Аврорин и др., 1964].

Для сравнения воздействия полярного и короткого дня на рост и морфологические особенности сеянцев акации желтой и сирени обыкновенной растения затеняли в течение 10 и 14 часов. Полученные данные свидетельствуют, что у обоих исследуемых видов на коротком дне наблюдалось снижение содержания в листьях углеводов и значительное увеличение их растворимых форм в стеблях и корнях. Такое распределение частично объясняет более высокую зимостойкость растений, выращенных в условиях короткого дня. У акации желтой аналогичное перераспределение углеводов фиксировали уже в середине августа, тогда как у сирени отмечалась некоторая задержка в накоплении растворимых углеводов в зимующих органах при коротком дне. Корни и стебли сирени на коротком дне, особенно в конце вегетационного периода, содержали значительно больше крахмала, чем листья. В условиях длинного дня эта разница была менее выражена [Шматок, 1956].

Заключение

В последние годы интерес к изучению реакции растений на круглосуточное освещение не угасает, а скорее даже увеличивается в связи с появлением так называемых «фабрик растений», или вертикальных ферм, где растения выращивают в условиях искусственного освещения и для повышения эффективности производства возможно использование аномальных свето-темновых циклов, которые могут быть как короче, так и длиннее обычного 24-часового суточного цикла. В том числе довольно широко практикуется и круглосуточное освещение растений с более низкой освещенностью, так как оно позволяет сокращать первоначальные и операционные затраты на освещение [Sysoeva et al., 2010]. Однако в искусственной среде непрерывный свет при постоянных остальных параметрах окружающей среды (температура, влажность и др.) у многих видов растений вызывает повреждения листьев в виде хлороза или некроза [Sysoeva et al., 2010; Velez-Ramirez et al., 2011; Shibaeva et al., 2023]. Возникает вопрос – почему же в условиях круглосуточного освещения во время полярного дня листья растений не повреждаются? Для ответа на него нами [Shibaeva et al., 2024] проведено специальное исследование с целью изучить и сопоставить реакцию аборигенных видов Субарктики и интродуцированных в ПАБСИ КНЦ РАН

растений одноименных родов на круглосуточное освещение в естественной среде (во время полярного дня и белых ночей) и в факторостатных условиях климатических камер. Объектами служили аборигенные растения Субарктики (герань лесная *Geranium sylvaticum*, гравилат речной *Geum rivale* и лапчатка прямостоячая *Potentilla erecta*) и интродуценты (герань гималайская *Geranium himalayense*, гравилат коралловый *Geum coccineum* и лапчатка темно-красная *Potentilla atrosanguinea*). Предполагалось, что аборигенные виды растений в процессе эволюции смогли адаптироваться к условиям освещения, характерным для северного полярного региона. Интродуцированные же в ПАБСИ виды растений происходят из регионов, где они исторически никогда не сталкивались с круглосуточным освещением, и поэтому не должны быть потенциально адаптированными к непрерывному освещению. Таким образом, наблюдения велись за растениями, которые росли при естественном круглосуточном освещении в течение полярного дня, и за растениями, которые подвергались воздействию 24-часового фотопериода в климатических камерах.

Важно отметить, что в строгом смысле постоянного круглосуточного освещения в природе не бывает [Velez-Ramirez et al., 2011]. В естественных условиях даже во время полярного дня при отсутствии полной темноты интенсивность света и его спектральный состав значительно меняются. Интенсивность солнечного излучения изменяется в течение дня синусоидально. Что касается спектральных колебаний, то давно было показано, что они устанавливают циркадные часы арктических птиц [Küll, 1976]. Добавим к этому, что в естественных условиях температура обычно колеблется в течение суточного цикла, тогда как в большинстве экспериментов в климатических камерах она поддерживается на постоянном уровне. В ряде экспериментов показано, что если в условиях искусственного непрерывного освещения температура дня и ночи различалась, создавая температурный градиент, то фотоповреждения листьев были выражены слабее или отсутствовали полностью [Yamashino et al., 2008; Sysoeva et al., 2010; Velez-Ramirez et al., 2011]. Таким образом, при постоянстве параметров внешней среды искусственное круглосуточное освещение вызывает фотоповреждение листьев, очевидно, вследствие окислительного стресса, основной причиной которого, по нашему мнению, является циркадная асинхрония, т. е. несоответствие между внутренними (эндогенными) ритмами организма и внешними светотемновыми циклами [Shibaeva et al., 2023].

В природе, в отличие от факторостатных условий, эндогенные ритмы в период полярного дня поддерживаются благодаря суточным колебаниям других факторов среды (интенсивности и спектрального состава света, температуры и влажности), которые, по всей видимости, прямо или опосредованно участвуют в контроле эндогенных ритмов и также могут выступать в роли задатчиков ритма [Velez-Ramirez et al., 2011; Shibaeva et al., 2024]. Когда же этого оказывается недостаточно и растения испытывают стресс, то у них происходит мобилизация защитных сил, призванных обеспечить их выживание в таких условиях. При этом установлено, что у растений обеих групп (аборигенов и интродуцентов) отсутствуют механизмы специфической устойчивости к круглосуточному освещению, а защитные реакции в данном случае носят неспецифический характер и инициируются вследствие слабо развивающегося фотоокислительного стресса [Shibaeva et al., 2024]. Сегодня подобные исследования особенно важны и актуальны, поскольку понимание процессов адаптации растений к условиям непрерывного освещения необходимо для разработки новых технологий арктического земледелия и садоводства, которые требуются для более широкого освоения и разностороннего использования человеком северных территорий.

Литература

- Аврорин Н. А., Андреев Г. Н., Головкин Б. Н., Кальнин А. А. Переселение растений на Полярный Север. М.-Л.: Наука, 1964. Ч. 1. 499 с.
- Андреев Г. Н. Интродукция травянистых растений в Субарктику. Л.: Наука, 1975. 167 с.
- Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 255 с.
- Вартапетян С. М., Онохина Ж. Ф. Суточный и сезонный ритм обмена азотистых веществ в листьях черники и кипрея в полярных условиях // Доклады Академии наук СССР. 1962. Т. 145, № 6. С. 1404–1407.
- Гончаров Н. П. Генетический контроль фотопериодической чувствительности у мягкой пшеницы // Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института растениеводства имени Н. И. Вавилова. 1987. Вып. 174. С. 7–11.
- Дадыкин В. П., Григорьева В. Г. О фотосинтезе у растений Заполярья при круглосуточном освещении // Доклады Академии наук СССР. 1951. Т. 80, № 2. С. 261–263.
- Данилов А. Н., Мириманян В. А. Фотосинтез растений Заполярья в природных условиях // Труды Ботанического института АН СССР. Сер. IV. Экспериментальная ботаника. 1948. Вып. 6. С. 29–73.
- Журбицкий З. И. Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 260 с.
- Журбицкий З. И., Вартапетян С. М. Влияние летнего полярного дня на ассимиляцию и клубнеобра-

зование картофеля // Физиология растений. 1956. Т. 3, вып. 1. С. 58–65.

Закман Л. М. Влияние повышенных доз минеральных удобрений на урожай и фотосинтез сельскохозяйственных культур на Крайнем Севере: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1962. 22 с.

Закман Л. М. Сезонные изменения содержания пигментов пластид в листьях местной и интродуцированной рябины за полярным кругом // Ботанический журнал. 1969. Т. 54, № 8. С. 1148–1157.

Каспарова С. А., Усова П. Г. Влияние минерального питания на накопление и превращение пластических веществ при созревании зерна в условиях низких температур // Доклады Академии наук СССР. 1948. Т. LX, № 8. С. 1367–1370.

Кислякова Т. Е. К вопросу о круглосуточном фотосинтезе растений на Крайнем Севере // Физиология растений. 1960. Т. 7, вып. 1. С. 62–65.

Кислякова Т. Е. О фотосинтезе картофеля в условиях Крайнего Севера // Физиология растений. 1958. Т. 5, вып. 2.

Костычев С. П., Базирина Е. Н., Чесноков В. А. Суточный ход фотосинтеза при незаходящем солнце в полярной зоне // Известия АН СССР. 1930. Сер. VII, № 7. С. 599–610.

Лукьянова Л. М., Локтева Т. Н., Булычева Т. М. Газообмен и пигментная система растений Кольской Субарктики. Апатиты: Кольск. фил. АН СССР, 1986. 126 с.

Разумов В. И., Смирнова М. И. Значение летнего «ночного» периода суток в полярных условиях для развития растений // Вестник социалистического растениеводства. 1940. № 1.

Шахов А. А. Эколого-физиологическая перестройка растений на фотоэнергетической основе // Физиологические основы северного растениеводства. Растение и среда. 1965. Т. 5. С. 5–17.

Шмакова Н. Ю., Ермолаева О. В., Лукьянова Л. М. К истории исследования фотосинтетической деятельности растений в Хибинах // Вестник Кольского научного центра РАН. 2011. № 2. С. 83–87.

Шматок И. Д. Адаптивные стратегии растений в условиях полярного дня // Ботанический журнал. 1995. Т. 80, № 3. С. 45–53.

Шматок И. Д. Влияние продолжительности дня в полярных условиях на содержание углеводов и минеральных веществ у желтой акации и обыкновенной сирени // Доклады Академии наук СССР. 1956. Т. 111, № 1. С. 213–216.

Шматок И. Д. Содержание аскорбиновой кислоты в листьях растений, произрастающих в полярных условиях // Вопросы ботаники и почвоведения в Мурманской области. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 82–117.

Шматок И. Д. Эколого-физиологическое изучение процесса фотосинтеза растений в полярных условиях // Вопросы ботаники и почвоведения Мурманской области. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 117–123.

Шульгин И. А. Солнечная энергия и растение. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 178 с.

Шульц Г. Э. Влияние длинного северного дня на развитие различных интродуцированных травянистых растений: Научный отчет. 1936.

Шульц Г. Э. Реакции древесно-кустарниковых пород на непрерывный летний день // Доклады Академии наук СССР. Новая серия. 1949. Т. 66, № 5. С. 985–988.

Huang H., Ullah F., Zhou D-X., Yi M., Zhao Y. Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses // Front. Plant Sci. 2019. Vol. 10. Art. 800. doi: 10.3389/fpls.2019.00800

Krüll F. The synchronizing effect of slight oscillations of light intensity on activity period of birds // Oecologia. 1976. Vol. 25. P. 301–308. doi: 10.1007/BF00345602

Los D. A., Murata N. Membrane fluidity and its roles in the perception of environmental signals // Biochim. Biophys. Acta. 2004. Vol. 1666(1-2). P. 142–157. doi: 10.1016/j.bbame.2004.08.002

Sakai A., Larcher W. Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1987. Vol. 62. 321 p.

Shibaeva T. G., Mamaev A. V., Titov A. F. Possible physiological mechanisms of leaf photodamage in plants grown under continuous lighting // Russ. J. Plant Physiol. 2023. Vol. 70. Art. 15. doi: 10.1134/S1021443722602646

Shibaeva T. G., Sherudilo E. G., Rubaeva A. A., Shmakova N. Y., Titov A. F. Response of Native and Non-Native Subarctic Plant Species to Continuous Illumination by Natural and Artificial Light // Plants. 2024. Vol. 13. Art. 2742. doi: 10.3390/plants13192742

Sysoeva M. I., Markovskaya E. F., Shibaeva T. G. Plant under continuous light: a review // Plant Stress. 2010. Vol. 4, no. 1. P. 5–17.

Velez-Ramirez A. I., van Ieperen W., Vreugdenhil D., Millenaar F. F. Plants under continuous light // Trends Plant Sci. 2011. Vol. 16. P. 310–318. doi: 10.1016/j.tplants.2011.02.003

Yamashino T., Ito S., Niwa Y., Kunihiro A., Nakamichi N., Mizuno T. Involvement of Arabidopsis clock-associated pseudo-response regulators in diurnal oscillations of gene expression in the presence of environmental time cues // Plant Cell Physiol. 2008. Vol. 49. P. 1839–1850. doi: 10.1093/pcp/pcn165

References

Andreev G. N. Introduction of herbaceous plants to the Subarctic. Leningrad: Nauka; 1975. 167 p. (In Russ.)

Avrorin N. A., Andreev G. N., Golovkin B. N., Kal'nin A. A. Plant migration to the polar north. Pt. 1. Moscow-Leningrad: Nauka; 1964. 499 p. (In Russ.)

Budyko M. I. Thermal balance of the earth's surface. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1956. 255 p. (In Russ.)

Dadykin V. P., Grigor'eva V. G. On photosynthesis in plants of the Arctic Circle under continuous lighting. Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1951;80(2):261–263. (In Russ.)

Daniilov A. N., Mirimanyan V. A. Photosynthesis of plants of the Arctic Circle in natural conditions. Trudy Botanicheskogo instituta AN SSSR. Ser. IV. Eksperimental'naya botanika = Proceedings of the Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences. Ser. IV. Experimental Botany. 1948;6:29–73. (In Russ.)

Goncharov N. P. Genetic control of photoperiodic sensitivity in soft wheat. Nauchno-tekhnicheskii

byulleten' Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rastenievodstva imeni N. I. Vavilova = *Bulletin of the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources*. 1987;174:7–11. (In Russ.)

Huang H., Ullah F., Zhou D-X., Yi M., Zhao Y. Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses. *Front. Plant Sci.* 2019;10:800. doi: 10.3389/fpls.2019.00800

Kasparova S. A., Usova P. G. The influence of mineral nutrition on the accumulation and transformation of plastic substances during grain ripening under low-temperature conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1948;LX(8):1367–1370. (In Russ.)

Kislyakova T. E. On the photosynthesis of potatoes in the Far North. *Fiziologiya rastenii = Plant Physiology*. 1958;5(2). (In Russ.)

Kislyakova T. E. On the question of 24-hour photosynthesis of plants in the Far North. *Fiziologiya rastenii = Plant Physiology*. 1960;7(1):62–65. (In Russ.)

Kostychev S. P., Bazyrina E. N., Chesnokov V. A. Daily course of photosynthesis during not-setting sun in the polar zone. *Izvestiya AN SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1930;VII(7):599–610. (In Russ.)

Krüll F. The synchronizing effect of slight oscillations of light intensity on activity period of birds. *Oecologia*. 1976;25:301–308. doi: 10.1007/BF00345602

Los D. A., Murata N. Membrane fluidity and its roles in the perception of environmental signals. *Biochim. Biophys. Acta*. 2004;1666(1-2):142–157. doi: 10.1016/j.bbamem.2004.08.002

Luk'yanova L. M., Lokteva T. N., Bulycheva T. M. Gas exchange and pigment system of plants of the Kola Subarctic. *Apatity: Kol'sk. fil. AN SSSR*; 1986. 126 p. (In Russ.)

Razumov V. I., Smirnova M. I. The significance of the summer "night" period of the day in polar conditions for plant development. *Vestnik sotsialisticheskogo rastenievodstva = Bulletin of Socialist Plant Growing*. 1940;1. (In Russ.)

Sakai A., Larcher W. Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1987. Vol. 62. 321 p.

Schultz G. E. The effect of the long northern day on the development of various introduced herbaceous plants: a scientific report. 1936. (In Russ.)

Schultz G. E. Reactions of woody and shrubby species to the continuous summer day. *Doklady Akademii nauk SSSR. Novaja serija = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. New series*. 1949;66(5):985–988. (In Russ.)

Shakhov A. A. Ecological and physiological restructuring of plants on a photo-energetic basis. *Fiziologicheskie osnovy severnogo rastenievodstva. Rasteniya i sreda = Physiological foundations of northern plant growing. Plant and environment*. 1965;5:5–17. (In Russ.)

Shibaeva T. G., Mamaev A. V., Titov A. F. Possible physiological mechanisms of leaf photodamage in plants grown under continuous lighting. *Russ. J. Plant Physiol.* 2023;70:15. doi: 10.1134/S1021443722602646

Shibaeva T. G., Sherudilo E. G., Rubaeva A. A., Shmakova N. Y., Titov A. F. Response of Native and

Non-Native Subarctic Plant Species to Continuous Illumination by Natural and Artificial Light. *Plants*. 2024; 13:2742. doi: 10.3390/plants13192742

Shmakova N. Yu., Ermolaeva O. V., Lukyanova L. M. On the history of research on the photosynthetic activity of plants in the Khibiny Mountains. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN = Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;2:83–87. (In Russ.)

Shmatok I. D. Adaptive strategies of plants in the conditions of the polar day. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1995;80(3):45–53. (In Russ.)

Shmatok I. D. Ecological and physiological study of the process of photosynthesis in plants growing in polar conditions. *Voprosy botaniki i pochvovedeniya v Murmanskoi oblasti = Issues of botany and soil science in the Murmansk Region*. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1962. P. 117–123. (In Russ.)

Shmatok I. D. Influence of the duration of the day in polar conditions on the content of carbohydrates and minerals in yellow acacia and common lilac. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1956;111(1):213–216. (In Russ.)

Shmatok I. D. The content of ascorbic acid in the leaves of plants growing in polar conditions. *Voprosy botaniki i pochvovedeniya v Murmanskoi oblasti = Issues of botany and soil science in the Murmansk Region*. Moscow-Leningrad: AN SSSR; 1962. P. 82–117. (In Russ.)

Shul'gin I. A. Solar energy and a plant. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1967. 178 p. (In Russ.)

Sysoeva M. I., Markovskaya E. F., Shibaeva T. G. Plant under continuous light: a review. *Plant Stress*. 2010;4(1):5–17.

Vartapetyan S. M., Onokhina Zh. F. Daily and seasonal rhythm of nitrogenous substances exchange in the leaves of bilberry and fireweed in polar conditions. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1962;145(6):1404–1407. (In Russ.)

Velez-Ramirez A. I., van Ieperen W., Vreugdenhil D., Millenaar F. F. Plants under continuous light. *Trends Plant Sci.* 2011;16: 310–318. doi: 10.1016/j.tplants.2011.02.003

Yamashino T., Ito S., Niwa Y., Kunihiro A., Nacamichi N., Mizuno T. Involvement of Arabidopsis clock-associated pseudo-response regulators in diurnal oscillations of gene expression in the presence of environmental time cues. *Plant Cell Physiol.* 2008;49: 1839–1850. doi: 10.1093/pcp/pcn165

Zakman L. M. The effect of increased doses of mineral fertilizers on the yield and photosynthesis of crops in the Far North: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Leningrad; 1962. 22 p. (In Russ.)

Zakman L. M. Seasonal changes in the content of plastid pigments in the leaves of native and introduced rowan trees in the Arctic Circle. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1969;54(8):1148–1157. (In Russ.)

Zhurbitskii Z. I. Theory and practice of the vegetation method. Moscow: Nauka; 1968. 260 p. (In Russ.)

Zhurbitskii Z. I., Vartapetyan S. M. Influence of the summer polar day on the assimilation and tuber formation of potatoes. *Fiziologiya rastenii = Plant Physiology*. 1956;1(3):58–65. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 08.11.2025; принята к публикации / accepted: 26.11.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Рубаева Александра Александровна

аспирант

e-mail: arubaeva@krc.karelia.ru

Шерудило Елена Георгиевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: sherudil@krc.karelia.ru

Шмакова Наталья Юрьевна

д-р биол. наук, заведующая лабораторией,
главный научный сотрудник

e-mail: shmanatalya@yandex.ru

Шibaева Татьяна Геннадиевна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: shibaeva@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Rubaeva, Alexandra

Doctoral Student

Sherudilo, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Shmakova, Natalya

Dr. Sci. (Biol.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Shibaeva, Tatyana

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

УДК 504.42

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ИЗОТОПАМИ УРАНА СНЕГА И ГРУНТОВЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ (СЕВЕРО-ЗАПАД РОССИИ)

Е. Н. Зыкова*, **С. Б. Зыков**, **С. А. Игловский**, **Е. Ю. Яковлев**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (наб. Северной Двины, 109, Архангельск, Россия, 163000), *elenazy@yandex.ru*

Представлены результаты геохимических исследований в районе Архангельской агломерации. Целью работы являлось изучение содержания тяжелых металлов и изотопов урана в снежном покрове и грунтовых водах. Содержание тяжелых металлов в образцах снега и грунтовых вод определяли методом масс-спектрометрии. По убыванию частоты встречаемости в пробах грунтовых вод средние концентрации тяжелых металлов (мкг/л) составляют следующий геохимический ряд: Fe (809,33) > Mn (426,38) > Zn (24,24) > Cr (16,08) > Ni (12,76) > Cu (2,99) > Ti (2,48) > V (1,5) > Pb (0,97) > U (0,91) > As (0,39) > Co (0,58) > Mo (0,32) > Sb (0,09) > Cd (0,02). Значения содержания тяжелых металлов сравнивались со значениями, установленными ВОЗ. Допустимые пределы для Fe и Mn были превышены, для других металлов отмечались концентрации ниже ПДК. Исследование содержания тяжелых металлов в снеге показало их миграцию в грунтовые воды после снеготаяния. Концентрации железа и марганца в подземных водах десятикратно превышали их значения в снеге. Концентрации Zn, Cr, Ni, Cu, Ti, V, Pb, As, Co, Mo, Sb и Cd в снеге были сопоставимы с концентрациями в подземных водах. По значениям суммарного загрязнения снега наиболее загрязненными оказались пригородные территории Архангельска – 216,91 мг/м².

Ключевые слова: водорастворимые формы; альфа-активность; масс-спектрометрия; предельно допустимые концентрации

Для цитирования: Зыкова Е. Н., Зыков С. Б., Игловский С. А., Яковлев Е. Ю. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и изотопами урана снега и грунтовых вод на территории Архангельской агломерации (Северо-Запад России) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 18–30. doi: 10.17076/eco2056

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ гос. регистрации 125022002727-2, FUUW-2025-0011).

E. N. Zykova*, S. B. Zikov, S. A. Iglovsky, E. Yu. Yakovlev. ASSESSMENT OF SNOW AND GROUNDWATER POLLUTION WITH HEAVY METALS AND URANIUM ISOTOPES IN THE ARKHANGELSK AGGLOMERATION (NORTHWEST RUSSIA)

*Federal Research Center for Integrated Study of the Arctic named after N. P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (109 Nab. Severnoy Dviny, 163000 Arkhangelsk, Russia), *elenazy@yandex.ru*

The article presents the results of geochemical and radioecological studies in the Arkhangelsk agglomeration. Snow cover and groundwater samples for studying the content of heavy metals and uranium isotopes were taken within the bounds of the agglomeration. The content of heavy metals was determined by mass spectrometry. The average concentrations of heavy metals in groundwater samples form the following geochemical series in descending order ($\mu\text{g/L}$): Fe (809,33) > Mn (426,38) > Zn (24,24) > Cr (16,08) > Ni (12,76) > Cu (2,99) > Ti (2,48) > V (1,5) > Pb (0,97) > U (0,91) > As (0,39) > Co (0,58) > Mo (0,32) > Sb (0,09) > Cd (0,02). The values for heavy metals were compared with the WHO levels. The permissible limits were exceeded for Fe and Mn, while the concentrations of other metals were below the permissible limits. The study shows that heavy metals from the snow cover migrate to groundwater after snowmelt. The concentrations of iron and manganese in the groundwater were ten times that of the snow. Concentrations of Zn, Cr, Ni, Cu, Ti, V, Pb, As, Co, Mo, Sb and Cd in snow were comparable to those in groundwater. In terms of total snow contamination, the suburban areas of Arkhangelsk were the most polluted – 216.91 mg/m².

Keywords: water-soluble forms; alpha activity; mass spectrometry; maximum permissible concentrations

For citation: Zykova E. N., Zikov S. B., Iglovsky S. A., Yakovlev E. Yu. Assessment of snow and groundwater pollution with heavy metals and uranium isotopes in the Arkhangelsk agglomeration (Northwest Russia). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 18–30. doi: 10.17076/eco2056

Funding. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state ID 125022002727-2, FUUW-2025-0011).

Введение

Загрязнение различных экосистем тяжелыми металлами является очень распространенной проблемой, в основном связанной с атмосферным осаждением от выбросов предприятий теплоэнергетики, выхлопных газов автотранспорта, свалок, работой сельскохозяйственных, горнодобывающих и других промышленных предприятий [Попова, Боос, 2020; Федеральный..., 2020; Ануфриева и др., 2021]. Большая часть тяжелых металлов, выбрасываемых в атмосферу, попадает на поверхность с осадками, образуя аномалии тяжелых металлов в верхнем слое почвы [Методика..., 2013; WHO..., 2017; Двинских, 2020]. В холодное время года зоной транзита тяжелых металлов является снег, эффективный поглотитель загрязняющих веществ из атмосферы, особенно в северных регионах, где снежный покров держится 7–8 месяцев в году [Московченко и др., 2021; Першина и др., 2021]. Поэтому снежный покров широко

используется в качестве надежного показателя для оценки типа загрязнения воздуха и отслеживания относительного вклада различных источников загрязнителей воздуха [СанПиН 2.1.3684-21, 1.2.3685-21; Azimi, 2004; Bacardi, Camarero, 2010]. Тяжелые металлы, накопленные за долгую зиму (их растворимые формы), после таяния снега мигрируют в грунтовые воды и, распространяясь по водоносным горизонтам, оказывают значительное влияние на качество питьевой воды, что представляет значительный риск для населения [Котова и др., 2019; Yakovlev et al., 2020, 2022; Malov, 2024]. Изучение растворимых форм тяжелых металлов позволит оценить их биодоступность, проследить их распределение в экосистемах, миграцию в грунтовые воды и последующий перенос в колодцы с питьевой водой, а также оценить токсикологические качества воды, используемой населением. Такие исследования особенно актуальны вблизи крупных городов и крупных промышленных предприятий [Слуковский и др., 2020].

Высокие концентрации урана характерны для минерализованных подземных вод [Pilecka et al., 2017].

Целью данной работы являлось проведение оценки загрязнения тяжелыми металлами и изотопами урана снежного покрова и грунтовых вод на территории Архангельской агломерации (северо-запад России).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) изучить физико-химические параметры грунтовых вод и снежного покрова Архангельской агломерации;

2) определить содержание тяжелых металлов в грунтовых водах и концентрации водорастворимых форм тяжелых металлов в снежном покрове Архангельской агломерации;

3) сопоставить полученные результаты со значениями ВОЗ и СанПиН для определения качества питьевой воды, а также степени загрязнения снежного покрова;

4) рассчитать значения суммарного площадного загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова Архангельской агломерации.

Характеристика района исследований

Отбор проб грунтовых вод и снежного покрова проводился на пригородных территориях (природно-антропогенных ландшафтах), расположенных в пределах трех ключевых районов – в окрестностях городов Архангельска, Северодвинска и Новодвинска, которые образуют Архангельскую агломерацию, крупнейшую в российской Арктической зоне. В трех крупных городах агломерации – Архангельске, Северодвинске и Новодвинске сосредоточено большое количество промышленных предприятий: атомного судостроения, машиностроения, теплоэнергетики, целлюлозно-бумажной промышленности. Значительную долю в состав загрязнителей вносит автотранспорт, также функционируют полигоны твердых бытовых отходов [Перхурова, 2021]. Города Архангельской агломерации наряду с Норильском являются лидерами среди городов Арктической зоны России по уровню антропогенного загрязнения атмосферы [Ануфриева и др., 2021]. Оказывает влияние и глобальный атмосферный перенос загрязняющих веществ. Снежный покров служит индикатором атмосферного загрязнения, и существует серьезная опасность загрязнения снежного покрова и последующего загрязнения грунтовых вод растворимыми формами тяжелых металлов, так как первый от поверхности водоносный горизонт является открытой

системой и не защищен водоупорным слоем от проникновения загрязнителей. В связи с этим актуальной задачей выступает оценка качества грунтовых вод, используемых местным населением. Отбор проб снега и воды из скважин в исследуемых районах был проведен в марте в период максимального снегонакопления, который совпадает с зимним маловодьем для подземных вод.

Отобрано 9 проб снега на пригородной территории г. Северодвинска, 7 проб на пригородной территории г. Новодвинска, 5 проб в пригороде Архангельска на правом берегу р. Северной Двины напротив г. Новодвинска и по 5 проб грунтовых вод на каждой из указанных территорий – то есть в общей сложности 21 проба снега (С106–С126) и 15 проб воды из скважин и колодцев (KW7–KW21) (рис. 1).

Материалы и методы

Отбор проб колодезной воды и снега производился в конце марта, когда мощность снежного покрова на поверхности почвы достигает максимальных значений, а на состав грунтовых вод оказывается минимальное влияние извне.

Все пробы воды отобраны из неглубоких колодцев глубиной от 1,2 до 6 м, выявляющих первый водоносный слой с поверхности [Borgmann, 2000]. Мощность снежного покрова в точках отбора изменялась от 55 до 78 см.

Пробы грунтовых вод для определения микроэлементов отбирали в полимерные пробирки объемом 50 мл, фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и подкисленный HNO_3 до $\text{pH} < 2$. В пробах воды нестабильные физические и химические параметры, такие как pH, минерализация, электропроводность (Eh) и температура, измерялись непосредственно во время отбора проб. Температуру воды и минерализацию определяли с помощью измерителя Five Go Cond F3 (Mettler-Toledo GmbH, Швейцария); анализ pH и Eh проводили с помощью измерителя pH/ORP HI 9126 (Hanna Instruments, США) со сменным электродом.

Отбор проб снега осуществлялся с участков ($S = 0,125 \text{ м}^2$) в пластиковые ведра объемом 11 л с использованием пластикового пробоотборника на всю глубину снежного покрова (за исключением нижнего 5-сантиметрового слоя, загрязненного подстилающими почвами). После доставки в лабораторию образцы снега растапливали при комнатной температуре в закрытых ведрах. Сразу после плавления проводились измерения нестабильных физических и химических параметров теми же методами, что и в грунтовых водах.

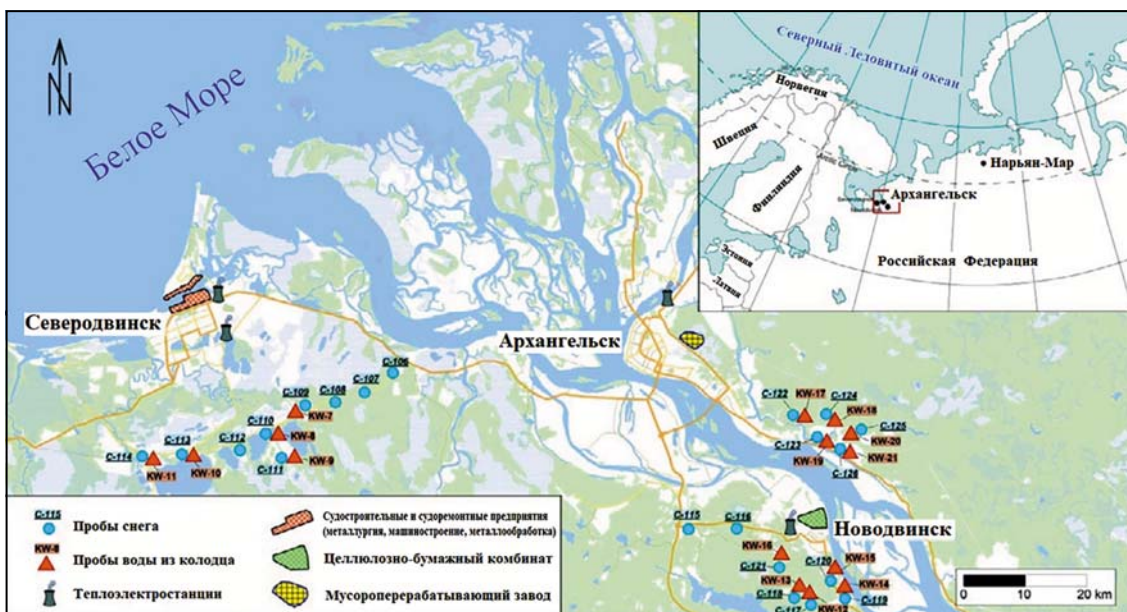


Рис. 1. Точки отбора проб снега и грунтовых вод на территории Архангельской агломерации
 Fig. 1. Snow and groundwater sampling points in the Arkhangelsk agglomeration

Анализ содержания тяжелых металлов в грунтовых водах и растворимых фракциях снега выполнен в лаборатории ЦКП НО «Арктика» САФУ имени М. В. Ломоносова (г. Архангельск) методом ICP-MS на приборе Aurora Elite (Bruker Daltonics, Inc.). Погрешность измерения составляла $\pm 0,005$ мг/кг.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 и на рис. 2 представлены результаты определения физико-химических параметров грунтовых вод Архангельской агломерации.

Для проб грунтовых вод, отобранных на пригородной территории Северодвинска, значения водородного показателя (рН) изменялись в пределах от 5,95 до 6,47, среднее значение составило 6,30. Для Новодвинского района значения рН варьировали от 6,80 до 8,38 со средним значением 7,60. Подземные воды в окрестностях Архангельска характеризовались минимальными изменениями значений рН – от 7,48 до 7,69 при среднем значении 7,60. Следует отметить, что в целом средние значения рН подземных вод для Архангельской агломерации находились в пределах диапазона, рекомендованного ВОЗ [WHO..., 2017].

Минерализация грунтовых вод в пригороде Северодвинска варьировала от 50,5 до 389 мг/л, среднее значение составило 246,2 мг/л. В окрестностях г. Новодвинска этот показатель находился в диапазоне от 27,5 до

685,3 мг/л при среднем значении 206,8 мг/л, в окрестностях Архангельска – от 424 до 1202 мг/л, среднее значение составило 739,6 мг/л, что более чем в 2 раза превышало среднюю минерализацию, характерную для пригородов Северодвинска и Новодвинска. В одном образце (KW17) минерализация превысила значения ПДК для питьевой воды в соответствии с российскими требованиями на 1000 мг/л. Повышенные значения минерализации в грунтовых водах в пригороде Архангельска были связаны с подпиткой колодезной воды из подземных вод с более высокой минерализацией и малой долей атмосферного пополнения из водоносного горизонта.

Электрическая проводимость (Eh) природной воды зависит от степени минерализации. Чем выше минерализация, тем выше значения проводимости. Эта зависимость прослеживается и в наших данных, что отражено в табл. 1. В окрестностях Новодвинска значения проводимости изменялись в довольно узком диапазоне от 134 до 165 мВ, со средним значением 147,2 мВ. Положительные средние значения Eh, характерные для грунтовых вод пригородов Северодвинска и Новодвинска, указывают на наличие в воде свободного кислорода, что более характерно для поверхностных вод [WHO..., 2017]. Отличающаяся картина установлена для подземных вод в окрестностях Архангельска, где отрицательные значения Eh были типичными для всех образцов (от -92 до $-17,2$ мВ, среднее значение $-48,8$ мВ), что определяется

Таблица 1. Физико-химические параметры грунтовых вод Архангельской агломерации

Table 1. Physical and chemical parameters of groundwater in the Arkhangelsk agglomeration

Территории Territories	Проводимость, μСм/см Conductivity, μS/cm	Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	Водородный показатель, рН	Окислительно-восстановительный потенциал, мВ Oxidation-reduction potential, mV
	Среднее значение Average value			
Северодвинск Severodvinsk	402,00	246,20	6,30	134,50
Новодвинск Novodvinsk	419,00	206,80	7,60	147,20
Архангельск Arkhangelsk	1463,00	739,60	7,63	-48,80
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 16)				
Среднее значение Average value	682,67	361,23	7,14	95,52
Максимум Maximum	2389,00	1202,00	8,38	205,00
Минимум Minimum	57,00	27,50	5,95	-92,00
Размах вариации Range of variation	2332,00	1174,50	2,43	297,00
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	613,60	299,16	0,67	96,24
Среднеквадратичное отклонение генеральное General standard deviation	702,37	299,16	0,67	96,24
Среднеквадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	727,02	359,06	0,78	108,94
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	106,5	99,4	11,0	114,0

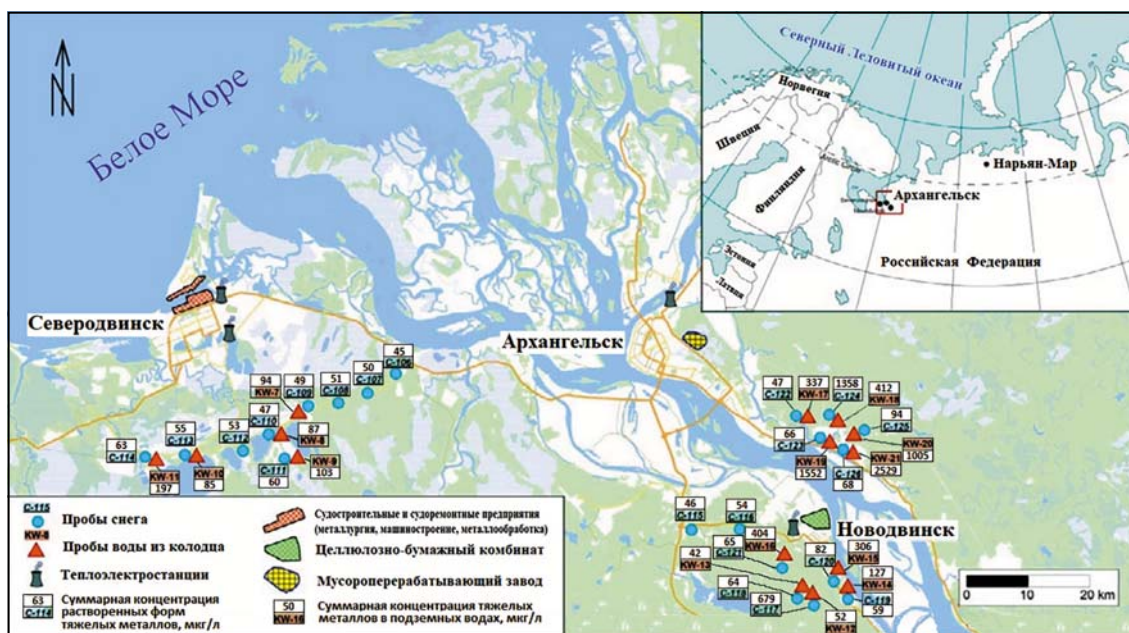


Рис. 2. Суммарная концентрация растворенных форм тяжелых металлов в снеге и тяжелых металлов в подземных водах на территории Архангельской агломерации, мкг/л

Fig. 2. Total concentration of dissolved forms of heavy metals in snow and heavy metals in groundwater in the Arkhangelsk agglomeration, μg/l

как режим восстановления из-за присутствия сероводорода и низковалентных металлов в воде (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mo^{4+} , V^{4+} , U^{4+}) [WHO..., 2017].

Результаты определения физико-химических параметров снежного покрова Архангельской агломерации представлены в табл. 2. Значения pH в талых снеговых водах, отобранных в окрестностях Северодвинска, варьировали в диапазоне от 6,25 до 8,81 со средним значением 7,15; в пробах из Новодвинского района – от 6,37 до 8,85 (средн. 7,14), из окрестностей Архангельска – от 6,54 до 6,80 (средн. 6,67). В чистых атмосферных осадках для территории России pH находится в диапазоне от 5,5 до 6,5 [СанПиН 1.2.3685-21]. Во всех исследованных авторами районах средние значения pH были выше фонового диапазона, что указывает на значительный уровень ощелачивания снега, вероятно, связанный с выпадением частиц карбонатной пыли [Двинских, 2020].

Значения минерализации талого снега варьировали в пригороде Северодвинска от 4,58 до 10,6 мг/л (средн. 6,41 мг/л), в окрестностях

Новодвинска – от 6,5 до 18,2 мг/л (средн. 10,1 мг/л), в окрестностях Архангельска – от 6,2 до 8,88 мг/л (средн. 7,15 мг/л). Средневзвешенные значения минерализации в атмосферных осадках для фоновых территорий России не превышают 10–15 мг/л [Федеральный..., 2017], и установленные величины данного показателя в пригородных территориях Северодвинска и Архангельска находятся в этом диапазоне. В окрестностях Новодвинска значения минерализации местами превышали фоновые, что, вероятно, связано с работой целлюлозно-бумажного комбината, расположенного в черте города. Значения проводимости напрямую связаны с минерализацией снега, и в районе исследования они варьировали от 45 до 222 мВ, среднее значение составило 162,81 мВ.

В табл. 3 представлены результаты определения содержания тяжелых металлов в грунтовых водах Архангельской агломерации. Выявленные значения были сопоставлены с рекомендуемыми ВОЗ [WHO..., 2017] и СанПиН 1.2.3685-21 с целью определения качества воды.

Таблица 2. Физико-химические параметры снежного покрова Архангельской агломерации

Table 2. Physical and chemical parameters of the snow cover in the Arkhangelsk agglomeration

Территории Territories	Проводимость, μСм/см Conductivity, μS/cm	Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l	Водородный показатель, pH	Окислительно-восстановительный потенциал, мВ Oxidation-reduction potential, mV
	Среднее значение Average value			
Северодвинск Severodvinsk	13,80	6,41	7,15	165,6
Новодвинск Novodvinsk	21,80	10,10	7,14	149,5
Архангельск Arkhangelsk	15,43	7,15	6,67	173,2
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 16)				
Среднее значение Average value	15,89	7,37	7,04	162,81
Максимум Maximum	39,41	18,20	8,85	222
Минимум Minimum	9,87	4,58	6,25	45
Размах вариации Range of variation	29,54	13,62	2,60	177
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	3,55	1,64	0,64	32,20
Среднеквадратичное отклонение генеральное General standard deviation	3,55	1,64	0,64	32,20
Среднеквадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	6,16	2,84	0,81	47,13
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	38,8	38,5	11,5	28,9

Таблица 3. Концентрации тяжелых металлов в грунтовых водах Архангельской агломерации, мкг/л
 Table 3. Concentrations of heavy metals in groundwater of the Arkhangelsk agglomeration, µg/L

Территории Territories	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Mo	Pb	V	As	Sb	Fe	U
	Среднее значение Average value														
Северодвинск Severodvinsk	4,05	15,80	138,80	0,31	11,88	3,28	16,15	0,004	0,25	1,54	1,51	0,69	0,08	1454	0,09
Новодвинск Novodvinsk	1,13	15,52	108,70	0,33	12,36	2,95	43,14	0,07	0,25	0,07	0,79	0,40	0,10	332	0,75
Архангельск Arkhangelsk	1,75	16,56	1108,20	1,13	15,08	2,63	18	–	0,49	0,40	2,06	0,57	0,10	1187	1,93
Предельно допустимые концентрации Maximum permissible concentrations															
ПДК ВОЗ WHO maximum permissible concentrations	–	50	500	100	20	2000	300	3	70	10	–	10	50	300	300
ПДК СанПиН maximum permissible concentrations according to SanPiN	100	50	500	100	100	1000	500	1	250	30	100	50	50	1000	150
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 19)															
Среднее значение Average value	2,48	16,08	426,38	0,58	12,76	2,99	24,24	0,02	0,32	0,97	1,50	0,39	0,09	809,33	0,91
Максимум Maximum	7	19,60	2468	2,02	18,40	6,92	118	0,17	0,78	2,68	3,21	0,96	0,20	2935	7,83
Минимум Minimum	0,90	14,00	3,10	0,18	9,50	1,13	6,70	0,00	0,13	0,16	0,19	0,01	0,04	124	0,02
Размах вариации Range of variation	6,10	5,60	2464,90	1,84	8,90	5,79	111,30	0,16	0,65	2,52	3,02	0,95	0,16	2811	7,81
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	1,49	0,94	486,25	0,37	2,30	1,11	17,61	0,02	0,14	0,75	0,56	0,25	0,04	463,29	1,26
Средне- квадратичное отклонение генеральное General standard deviation	1,80	1,32	676,52	0,49	2,64	1,55	27,44	0,04	0,19	0,86	0,76	0,29	0,05	668,45	2,02
Средне- квадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	1,87	1,36	700,26	0,51	2,73	1,60	28,40	0,04	0,20	0,89	0,78	0,30	0,05	691,91	2,09
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	75,40	8,50	164,20	88	21,40	53,50	117,20	285,3	60,10	92	52,2	76,60	57,6	85,50	229,2

По убыванию частоты встречаемости в пробах грунтовых вод средние концентрации тяжелых металлов (мкг/л) составляют следующий геохимический ряд: Fe (809,33) > Mn (426,38) > Zn (24,24) > Cr (16,08) > Ni (12,76) > Cu (2,99) > Ti (2,48) > V (1,5) > Pb (0,97) > U (0,91) > As (0,39) > Co (0,58) > Mo (0,32) > Sb (0,09) > Cd (0,02).

Концентрация Fe изменялась от 124 до 2935 мкг/л, в среднем 809,33 мкг/л, а допустимый предел ВОЗ составляет 300 мкг/л, СанПин – 1000 мкг/л. Рассматривая распределение железа, можно видеть, что во всех пробах, взятых в окрестностях Северодвинска и Архангельска, концентрация Fe была существенно выше рекомендованных значений; в районе Новодвинска две пробы незначительно превышают нормы по железу.

Концентрации Mn варьировали от 3,1 до 2468 мкг/л, среднее значение составило 426,38 мкг/л при допустимых пределах 500 мкг/л по ВОЗ и СанПин. Во всех пробах грунтовых вод, взятых в пригородах Северодвинска и Новодвинска, его содержание не превышает ПДК, но в окрестностях Архангельска выявлены три пробы с аномально высокими значениями содержания Mn (KW19–KW21).

Содержание железа и марганца в почвах Архангельского промышленного района достаточно велико, особенно в почвах природно-антропогенных ландшафтов. Городские почвы имеют более легкий гранулометрический состав, чем почвы пригородных территорий, поэтому при промывном водном режиме, характерном для региона, железо и марганец в значительной степени вымываются из верхних слоев в нижележащие горизонты и грунтовые воды. Напротив, почвы ненарушенных пригородных территорий преимущественно глинистые и суглинистые с повышенным содержанием органического вещества, что способствует закреплению ТМ в их поверхностном слое [Евдокимова и др., 2012].

Концентрация Zn изменялась от 6,7 до 118 мкг/л, со средним значением 24,24 мкг/л. Во всех изученных образцах наблюдались довольно низкие его концентрации, относительно равномерное распределение по ключевым районам Архангельской агломерации, а максимальные концентрации цинка были значительно ниже допустимых пределов, установленных ВОЗ (300 мкг/л) и СанПиН (500 мкг/л).

Концентрации Cr в подземных водах варьировали в диапазоне от 14,0 до 19,6 мкг/л, среднее значение составило 16,08 мкг/л. Разница концентраций хрома в пробах грунтовых

вод из всех указанных районов была незначительной и превышения ПДК по ВОЗ (50 мкг/л) и СанПиН (50 мкг/л) не наблюдалось.

Содержание Ni в подземных водах Архангельской агломерации варьировало от 9,5 до 18,4 мкг/л при среднем значении 12,76 мкг/л, что ниже допустимых пределов его содержания по ВОЗ (20 мкг/л) и СанПиН (100 мкг/л). Максимальные концентрации остальных металлов (Cu, V, Pb, U, As, Co, Mo, Sb и Cd) были также значительно ниже ПДК (табл. 3).

В табл. 4 и на рис. 2 представлены результаты определения содержания водорастворимых форм тяжелых металлов в снежном покрове Архангельской агломерации. Средние концентрации (мкг/л) распределились в следующем порядке: Mn (104,22) > Fe (85,71) > Zn (17,10) > Cr (14,52) > Ni (9,83) > V (1,55) > Cu (1,05) > Ti (0,89) > Pb (0,39) > As (0,27) > Mo (0,2) > Co (0,16) > Sb (0,06) > Cd (0,02).

Поскольку содержание водорастворимых форм тяжелых металлов в снеге очевидно влияет на качество питьевой грунтовой воды, полученные величины также были сопоставлены с рекомендуемыми для питьевой воды по ВОЗ [WHO..., 2017] и СанПиН [СанПиН 1.2.3685-21]. Превышение фоновых значений установлено только для Mn в двух точках опробования – С-117 (636 мкг/л) и С-124 (1315 мкг/л) при ПДК 500 мкг/л. Концентрации всех остальных элементов не превышают предельно допустимых. Также выявлены очень низкие значения концентрации урана в снеге, составившие $n \times 10^{-8}$ г/л. Поэтому полученные данные в таблицу не вошли.

На рис. 2 показана суммарная концентрация растворенных форм тяжелых металлов в снеге и тяжелых металлов в подземных водах на территории Архангельской агломерации. Суммарная концентрация растворенных форм тяжелых металлов в снеге имеет максимальные значения в окрестностях Архангельска (1358 мкг/л) и Новодвинска (679 мкг/л), а в окрестностях Северодвинска не превышает 94 мкг/л. Суммарная концентрация тяжелых металлов в подземных водах в окрестностях Архангельска составляет 2529 мкг/л, в Северодвинске – уже 306 мкг/л, в окрестностях Новодвинска не превышает 197 мкг/л. Окрестности Архангельска являются наиболее загрязненными по суммарной концентрации растворенных форм тяжелых металлов в снеге и в подземных водах.

В табл. 5 представлены данные о площадном загрязнении снежного покрова Архангельской агломерации тяжелыми металлами.

Таблица 4. Концентрации водорастворимых форм тяжелых металлов в пробах снега Архангельской агломерации, мкг/л

Table 4. Concentrations of water-soluble forms of heavy metals in snow samples from the Arkhangelsk agglomeration, µg/L

Территории Territories	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Mo	Pb	V	As	Sb	Fe
	Среднее значение Average value													
Северодвинск Severodvinsk	0,90	14,90	6,92	0,15	9,66	0,95	15,95	0,02	0,227	0,42	1,515	0,054	0,05	94,60
Новодвинск Novodvinsk	0,90	13,80	122,80	0,20	10,00	1,20	15,80	0,01	0,20	0,20	1,70	0,3	0,10	70,50
Архангельск Arkhangelsk	0,88	14,68	40,48	0,16	9,98	1,09	21,00	0,03	0,13	0,27	1,38	0,40	0,07	86,20
Предельно допустимые концентрации Maximum permissible concentrations														
ПДК ВОЗ WHO maximum permissible concentrations	–	50	500	100	20	2000	300	3	70	10	–	10	50	300
ПДК СанПиН maximum permissible concentrations according to SanPiN	100	50	500	100	100	1000	500	1	250	30	100	50	50	1000
Описательная статистика Descriptive statistics (n = 19)														
Среднее значение Average value	0,89	14,52	104,22	0,16	9,83	1,05	17,10	0,02	0,20	0,39	1,55	0,27	0,06	85,71
Максимум Maximum	1,19	15,70	1315	0,24	10,60	2,36	33,00	0,06	0,67	1,50	4,65	0,75	0,07	118
Минимум Minimum	0,73	12,80	2,30	0,13	9,10	0,74	8,50	0,00	0,06	0,20	0,32	0,03	0,05	50
Размах вариации Range of variation	0,46	2,90	1312,70	0,11	1,50	1,62	24,50	0,06	0,61	1,30	4,33	0,72	0,02	68
Среднее линейное отклонение Average linear deviation	0,09	0,55	165,96	0,02	0,31	0,24	5,16	0,02	0,11	0,20	0,79	0,19	0,01	11,24
Средне- квадратичное отклонение генеральное General standard deviation	0,11	0,76	301,58	0,03	0,39	0,36	6,60	0,02	0,15	0,34	1,06	0,23	0,01	15,87
Средне- квадратичное отклонение по выборке Standard deviation of the sample	0,11	0,78	309,03	0,03	0,40	0,37	6,77	0,02	0,15	0,35	1,08	0,23	0,01	16,27
Коэффициент вариации Coefficient of variation, %	12,80	5,40	296,50	16,00	4,10	35,10	39,60	91,30	78,50	91,40	70	87,70	15,30	19

Анализ общего площадного загрязнения для всех изученных металлов на 1 м² выявил наименьшую загрязненность снежного покрова в Северодвинском районе (~77 мг/м²), в то время как общий показатель загрязнения снега в Новодвинском и Архангельском районах был почти в три раза выше и составил 210,51 и 216,91 мг/м² соответственно.

По большинству элементов снежный покров в пригородах Архангельска и Новодвинска имел сопоставимые величины площадного загрязнения, в то время как Северодвинский район отличался низкими значениями. Близкие величины площадного загрязнения во всех трех ключевых районах имели Cr, Ni, Cu и Zn. Отличия в концентрациях тяжелых металлов, осажденных на 1 м², между исследуемыми ключевыми районами связаны с разными

Таблица 5. Площадное загрязнение тяжелыми металлами снежного покрова Архангельской агломерации, мг/м²

Table 5. Surface contamination of the snow cover in the Arkhangelsk agglomeration by heavy metals, mg/m²

Металл Metal	Северодвинск Severodvinsk	Новодвинск Novodvinsk	Архангельск Arkhangelsk
Ti	2,500	10,757	9,134
Cr	1,017	1,409	1,196
Mn	2,976	15,205	17,722
Co	0,041	0,148	0,127
Ni	1,034	1,201	1,159
Cu	0,929	1,510	1,041
Zn	4,615	4,253	6,259
Cd	0,005	0,005	0,002
Mo	0,011	0,017	0,007
Pb	0,306	0,830	0,821
V	0,388	0,832	0,906
As	0,011	0,169	0,107
Sb	0,058	0,103	0,125
Fe	63,372	174,426	178,306
Σ (суммарно) Σ (total)	77,26	210,51	216,91

источниками загрязнения, удаленностью точек отбора проб от источников выбросов тяжелых металлов, различиями в направлении движения воздушных масс и рядом других факторов.

Заключение

Анализ грунтовых вод Архангельской агломерации позволил установить, что средние значения водородного показателя соответствовали рекомендованным ВОЗ и СанПиН; повышенная минерализация грунтовых вод была связана с подпиткой колодезной воды подземными водами из пород, богатых железом и марганцем. Средние значения pH талого снега повсеместно превышали фоновые, что связано с загрязнением атмосферы выбросами промышленных предприятий и автотранспорта, содержащими щелочные и щелочноземельные элементы, повышающие щелочность снега. Значения минерализации снега превышали фоновые только в окрестностях Новодвинска, что связано с воздействием целлюлозно-бумажного комбината.

При сопоставлении значений содержания тяжелых металлов в грунтовых водах со значениями, рекомендованными ВОЗ и СанПиН, выявлено, что максимальные содержания железа превышают допустимый предел, установленный ВОЗ, в 9 раз, а установленный СанПин – в 3 раза. Концентрации марганца превышают допустимый предел по ВОЗ и СанПин в 5 раз в окрестностях Архангельска, не превышая ПДК на других территориях. Концентрации других металлов были ниже ПДК. Почвы ненарушенных пригородных территорий преимущественно глинистые и суглинистые с повышенным содержанием органического вещества. Это способствует закреплению ТМ в поверхностном слое и дальнейшей их миграции в грунтовые воды. Концентрации растворенных форм марганца в снежном покрове исследуемого района превышают допустимый предел, рекомендованный ВОЗ и СанПин, в 2,5 раза.

Показатели площадного загрязнения снежного покрова тяжелыми металлами в пригородах Архангельска и Новодвинска были в три раза выше, чем в Северодвинском районе, за счет содержания Ti, Mn, Fe в атмосферных выбросах. Причины различий по этому показателю между исследуемыми районами связаны с разными источниками загрязнения, удаленностью точек отбора проб от источников выбросов тяжелых металлов, разнонаправленным движением воздушных масс.

Литература

Ануфриева А. Ф., Безуглая Е. Ю., Загайнова М. С. и др. Состояние загрязнения атмосферы в городах России на 2020 год. СПб.: Росгидромет, 2021. 254 с.

Двинских С. А. Факторы формирования и элементы химического состава поверхностных вод: учеб.-метод. пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет [Электронный ресурс]. Пермь, 2020. 77 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/dvinskix-factory-formirovaniya-i-elementy-xim-sostava-poverxnostnyx-vod.pdf> (дата обращения: 23.12.2025).

Евдокимова В. П., Попова Л. Ф., Тюлева В. В., Бечина И. Н., Усачева Т. В. Особенности накопления железа и марганца в почвах городов Архангельской промышленной агломерации // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2012. № 4. С. 99–104.

Котова Е. И., Кузнецова И. А., Крячюнас В. В., Игловский С. А., Мироненко К. А., Бедрина Д. Д. Пространственное распределение меди, ванадия, никеля и свинца в почвах города Мончегорска // Успехи современного естествознания. 2019. № 12. С. 70–76.

Методика измерений объемной активности изотопов урана (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U) в пробах природных (пресных и минерализованных), технологических и сточных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. М.: ФГУП ВИМС, 2013. 16 с.

Московченко Д. В., Пожитков Р. Ю., Соромтин А. В. Геохимические характеристики снежного покрова г. Тобольска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 5. С. 156–169. doi: 10.18799/24131830/2021/5/3195

Перхурова О. В. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2020 год. Архангельск: САФУ, 2021. 478 с.

Першина Н. А., Павлова М. Т., Полищук А. И., Семенец Е. С. Ежегодные данные о химическом составе и кислотности осадков. СПб.: Росгидромет, Амирит, 2021. 114 с.

Попова Л. Ф., Боос О. Д. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в Архангельске // Молодой ученый. 2020. № 49(339). С. 488–490.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

Слуковский З. И., Гузева А. В., Григорьев В. А., Даувальтер В. А., Мицуков А. С. Палеолимнологическая реконструкция техногенного воздействия на экосистему оз. Большой Вудъявр (Кировск, Мурманская область, Артика): новые геохимические данные // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 4. С. 96–107. doi: 10.24412/1816-1863-2020-4-96-107

Федеральный закон от 29.07.2017 (с изменениями от 22.12.2020) «О ведении гражданами садоводства и огородничества для собственных нужд и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Чагина Н. Б., Айвазова Е. А., Иванченко Н. Л., Варакин Е. А., Соболев Н. А. Исследование содержания тяжелых металлов в снеговом покрове г. Архангельска и их влияние на здоровье населения // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер. Естественные науки. 2016. № 4. С. 57–68. doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.4.57

Azimi S. Sources, flux et bilan des retombées atmosphériques de métaux en Ile-de-France: Doctoral dissertation, Ecole des Ponts Paris Tech. 2004. 289 с.

Bacardi M., Camarero L. Atmospherically deposited major and trace elements in the winter snowpack along a gradient of altitude in the Central Pyrenees: The seasonal record of long-range fluxes over SW Europe // Atmos. Environ. 2010. No. 44(4). С. 582–595. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.022

Borgmann U. Methods for assessing the toxicological significance of metals in aquatic ecosystems: bioaccumulation–toxicity relationships, water concentrations and sediment spiking approaches // Aquat. Ecosyst. Health Manag. 2000. No. 3. P. 277–289. doi: 10.1080/14634980008657027

Malov A. I. Assessment of water supply to the east European Arctic agglomeration from groundwater, taking into account their quality and health risks // Environ. Pollut. 2024. Vol. 360. Art. 124636. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124636

Pilecka J., Grinfelde I., Valujeva K., Straupe I., Purmalis O. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Jelgava // Rural and environmental engineering, landscape architecture. 2017. Vol. 1. P. 173–179. doi: 10.22616/rrd.23.2017.026

Prohaska T., Irrgeher J., Benefield J. et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) // Pure Appl. Chem. 2022. Vol. 94, iss. 5. P. 573–600. doi: 10.1515/pac-2019-0603

WHO, Guidelines for Drinking-water Quality, fourth ed. incorporating the first addendum. Geneva, Switzerland, 2017. 631 с.

Yakovlev E., Zykova E., Zykov S., Druzhinina A., Ivanchenko N. Evaluation of heavy metal pollution of snow and groundwater on the territory of suburban community garden plots of the Arkhangelsk agglomeration (Northwest Russia) // Pollution. 2022;8(4): 1448–1473. doi: 10.22059/POLL.2022.342253.1456

Yakovlev E. Y., Zykova E. N., Zykov S. B., Malkov A. V., Bazhenov A. V. Heavy metals and radionuclides distribution and environmental risk assessment in soils of the Severodvinsk industrial district, NW Russia // Environ. Earth Sci. 2020;79(10):218. doi: 10.1007/s12665-020-08967-8

References

- Anufrieva A. F., Bezuglaya E. Yu., Zagainova M. S. et al. State of air pollution in Russian cities in 2020. St. Petersburg: Rosgydromet; 2021. 254 p. (In Russ.)
- Azimi S. Sources, flux and atmospheric retombées in Ile-de-France: Dr. Sci. thesis. Paris: Ecole des Ponts Paris Tech; 2004. 289 p.
- Bacardi M., Camarero L. Atmospherically deposited major and trace elements in the winter snowpack along a gradient of altitude in the Central Pyrenees: The seasonal record of long-range fluxes over SW Europe. *Atmos. Environ.* 2010;44(4):582–595. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.022
- Borgmann U. Methods for assessing the toxicological significance of metals in aquatic ecosystems: bio-accumulation–toxicity relationships, water concentrations and sediment spiking approaches. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* 2000;3:277–289. doi: 10.1080/14634980008657027
- Chagina N. B., Aivazova E. A., Ivanchenko N. L., Varakin E. A., Sobolev N. A. Heavy metals in snow cover of Arkhangelsk and evaluation of their influence on population health. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki = Bulletin of Northern (Arctic) Federal University. Natural Sciences Series.* 2016;4:57–68. (In Russ.). doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.4.57
- Dvinskikh S. A. Factors of formation and elements of the chemical composition of surface waters: a study guide. Perm; 2020. 77 p. (In Russ.) URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/dvinskix-factory-formirovaniya-i-elementy-xim-sostava-poverxnostnyx-vod.pdf>. (accessed: 23.12.2025).
- Evdokimova V. P., Popova L. F., Tyuleva V. V., Bechina I. N., Usacheva T. V. Features of iron and manganese accumulation in soils of the cities of the Arkhangelsk industrial agglomeration. *Vestnik MGOU. Ser. Estestvennye nauki = Bulletin of Moscow State University. Natural Sciences Series.* 2012;4:99–104. (In Russ.)
- Federal Law of July 29, 2017 (as amended on December 22, 2020) 'On the conduct of gardening and vegetable gardening by citizens for their own needs and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation'. (In Russ.)
- Kotova E. I., Kuznetsova I. A., Kryauchynas V. V., Iglovskii S. A., Mironenko K. A., Bedrina D. D. Spatial distribution of copper, vanadium, nickel and lead in the soils of the city of Monchegorsk. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences.* 2019;12:70–76. (In Russ.)
- Malov A. I. Assessment of water supply to the east European Arctic agglomeration from groundwater, taking into account their quality and health risks. *Environ. Pollut.* 2024;360:124636. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124636
- Methodology for measuring the volumetric activity of uranium (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U) in samples of natural (fresh and mineralized), industrial and waste water using the alpha-spectrometric method with radiochemical preparation. Moscow: VIMS; 2013. 16 p. (In Russ.)
- Moskovchenko D. V., Pozhitkov R. Yu., Soromotin A. V. Geochemical characteristics of snow cover in Tobolsk. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering.* 2021;5:156–169. (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2021/5/3195
- Perkhurova O. V. State and protection of the environment of the Arkhangelsk Region for 2020. Arkhangelsk: SAFU; 2021. 478 p. (In Russ.)
- Pershina N. A., Pavlova M. T., Polishchuk A. I., Semenets E. S. Annual data on the chemical composition and acidity of precipitation. Rosgydromet. St. Petersburg: Rosgydromet, Amirit; 2021. 114 p. (In Russ.)
- Pilecka J., Grinfelde I., Valujeva K., Straupe I., Purmalis O. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Jelgava. *Rural and environmental engineering, landscape architecture.* 2017;1:173–179. doi: 10.22616/rrd.23.2017.026
- Popova L. F., Boos O. D. Assessment of atmospheric air pollution in Arkhangelsk. *Molodoi uchenyi = Young Scientist.* 2020;49(339):488–490. (In Russ.)
- Prohaska T., Irrgeher J., Benefield J. et al. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2022;94(5):573–600. doi: 10.1515/pac-2019-0603
- SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness to humans from environmental factors. (In Russ.)
- SanPiN 2.1.3684-21. Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial and public premises, organization and conduct of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures. (In Russ.)
- Slukovskii Z. I., Guzeva A. V., Grigor'ev V. A., Dauval'ter V. A., Mitsukov A. S. Paleolimnological reconstruction of the technogenic impact on the ecosystem of Lake Bolshoi Vudjavr (Kirovsk, Murmansk Region, Arctic): new geochemical data. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii = Ecology of Urbanized Territories.* 2020;4:96–107. (In Russ.). doi: 10.24412/1816-1863-2020-4-96-107
- WHO, Guidelines for Drinking-water Quality, fourth ed. incorporating the first addendum. Geneva, Switzerland; 2017. 631 p.
- Yakovlev E., Zykova E., Zykov S., Druzhinina A., Ivanchenko N. Evaluation of heavy metal pollution of snow and groundwater on the territory of suburban community garden plots of the Arkhangelsk agglomeration (Northwest Russia). *Pollution.* 2022;8(4):1448–1473. doi: 10.22059/POLL.2022.342253.1456
- Yakovlev E. Y., Zykova E. N., Zykov S. B., Mal'kov A. V., Bazhenov A. V. Heavy metals and radionuclides distribution and environmental risk assessment in soils of the Severodvinsk industrial district, NW Russia. *Environ. Earth Sci.* 2020;79(10):218. doi: 10.1007/s12665-020-08967-8

Поступила в редакцию / received: 22.01.2025; принята к публикации / accepted: 26.12.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зыкова Елена Николаевна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник
лаборатории экологической радиологии Института
геодинамики и геологии

e-mail: elenazy@yandex.ru

Зыков Сергей Борисович

научный сотрудник лаборатории экологической
радиологии Института геодинамики и геологии

e-mail: rigascientist@gmail.com

Игловский Станислав Анатольевич

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории экологической радиологии Института
геодинамики и геологии

e-mail: iglovskys@mail.ru

Яковлев Евгений Юрьевич

канд. геол.-мин. наук, заведующий лабораторией
экологической радиологии Института геодинамики
и геологии

e-mail: yakov24lev99@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Zykova, Elena

Cand. Sci. (Geog.), Senior Researcher

Zykov, Sergey

Researcher

Iglovsky, Stanislav

Cand. Sci. (Geog.), Leading Researcher

Yakovlev, Evgeny

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory

УДК 581.526,33:551.794 (470.42)

К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ БЕРЕЗОВЫХ ЛЕСОВ НА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Н. В. Благовещенская

Ульяновский государственный университет (ул. Л. Толстого, 42, Ульяновск, Россия, 432017)

Проведенные исследования позволили решить спорный вопрос о первичности или вторичности березовых лесов на Приволжской возвышенности. На основании анализа полученных спорово-пыльцевых и радиоуглеродных данных восстановлены основные этапы формирования березовых лесов и роль *Betula sect. Albae* на Приволжской возвышенности. Установлено, что береза появилась на изучаемой территории около 10 500 л. н. в составе сильно разреженных древесных сообществ холодной «тундростепи». Наибольшее развитие березовые древостои в составе настоящих сосново-березовых и березовых ценозов получили в период 8000–6000 л. н. В последний период голоцена (начиная с 2500 л.н. по настоящее время) в результате активной антропогенной нагрузки образуются уже вторичные (производные) типы леса с березой. Полученные данные хорошо согласуются с таковыми для сопредельных территорий (Предуралья, Среднерусской возвышенности, южных отрогов Приволжской возвышенности, Центрального Черноземья). Таким образом, на основании проведенных палеогеографических реконструкций и современного анализа распространения березовых сообществ коренными (условно-коренными, первичными, доагрикультурными) на Приволжской возвышенности следует считать современные группы ассоциаций березовых сообществ: березовые леса дубравные (*Betuleta nemorosa*); березовые леса заболоченные (*Betuleta uliginosa*); березовые леса остепненные (*Betuleta substepposa*). Производными (вторичными) следует признать березовые леса зеленомошники (*Betuleta hylocomiosa*), травяные (*Betuleta herbosa*), а также следующие ассоциации: сосново-березовые леса коротконожково-вейниковые (*Pinetum betuleto calamagrostidoso-brachypodiosum*); круглолистногруппшанковые (*Pinetum betuleto pyroliosum rotundifoliae*); кошачьялапковые (*Pinetum betuleto-antennariosum*), сероватовеяниковые (*Pinetum betuleto-calamagrostidosum canescens*).

Ключевые слова: голоцен; история растительности; березовые леса; спорово-пыльцевые комплексы; Приволжская возвышенность

Для цитирования: Благовещенская Н. В. К вопросу о происхождении березовых лесов на Приволжской возвышенности // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 31–43. doi: 10.17076/eco2123

N. V. Blagoveshchenskaya. ON THE ORIGIN OF BIRCH FORESTS ON THE VOLGA UPLAND

Ulyanovsk State University (42 L. Tolstoy St., 432017 Ulyanovsk, Russia)

Spore-pollen and radiocarbon data were analyzed, resulting in the mapping of the main stages in the formation of birch forests and the forest-forming role of *Betula* sect. *Albae* on the Volga Upland. It has been established that birch appeared in the study area around 10 500 years BP as part of highly sparse tree communities of the cold 'tundra-steppe'. The extent of birch stands within real pine-birch and birch cenoses was the greatest in the period 8000–6000 yrs. BP. In the last period of the Holocene (from 2500 yrs. BP onwards), high anthropogenic pressure has led to the formation of secondary forest types with birch. However, primary (native, pre-agricultural) forests with birch have also been preserved, especially in southern parts of the Volga Upland. These results are in good agreement with data for the adjacent territories (Cis-Urals, Central Russian Upland, southern spurs of the Volga Upland, Central Black Earth Region). Thus, based on the paleogeographic reconstructions and modern analysis of the distribution of birch communities, the modern groups of birch community associations native (primary) to the Volga Upland include: oak-birch forests (*Betuleta nemorosa*); paludal birch forests (*Betuleta uliginosa*); sub-steppe birch forests (*Betuleta substepposa*). The types to be recognized as secondary are feather-moss birch forests (*Betuleta hylocomiosa*); herbaceous birch forests (*Betuleta herbosa*), and the following associations: pine-birch forests with reed grass (*Pinetum betuleto calamagrostidoso-brachypodiumsum*); with round-leaved wintergreen (*Pinetum betuleto pyroliosum rotundifoliae*); with catsfoot (*Pinetum betuleto-antennariosum*), with purple small-reed (*Pinetum betuleto-calamagrostidosum canescens*).

Keywords: the Holocene; history of vegetation; birch forests; spore-pollen complexes; Volga Upland

For citation: Blagoveshchenskaya N. V. On the origin of birch forests on the Volga Upland. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 31–43. doi: 10.17076/eco2123

Введение

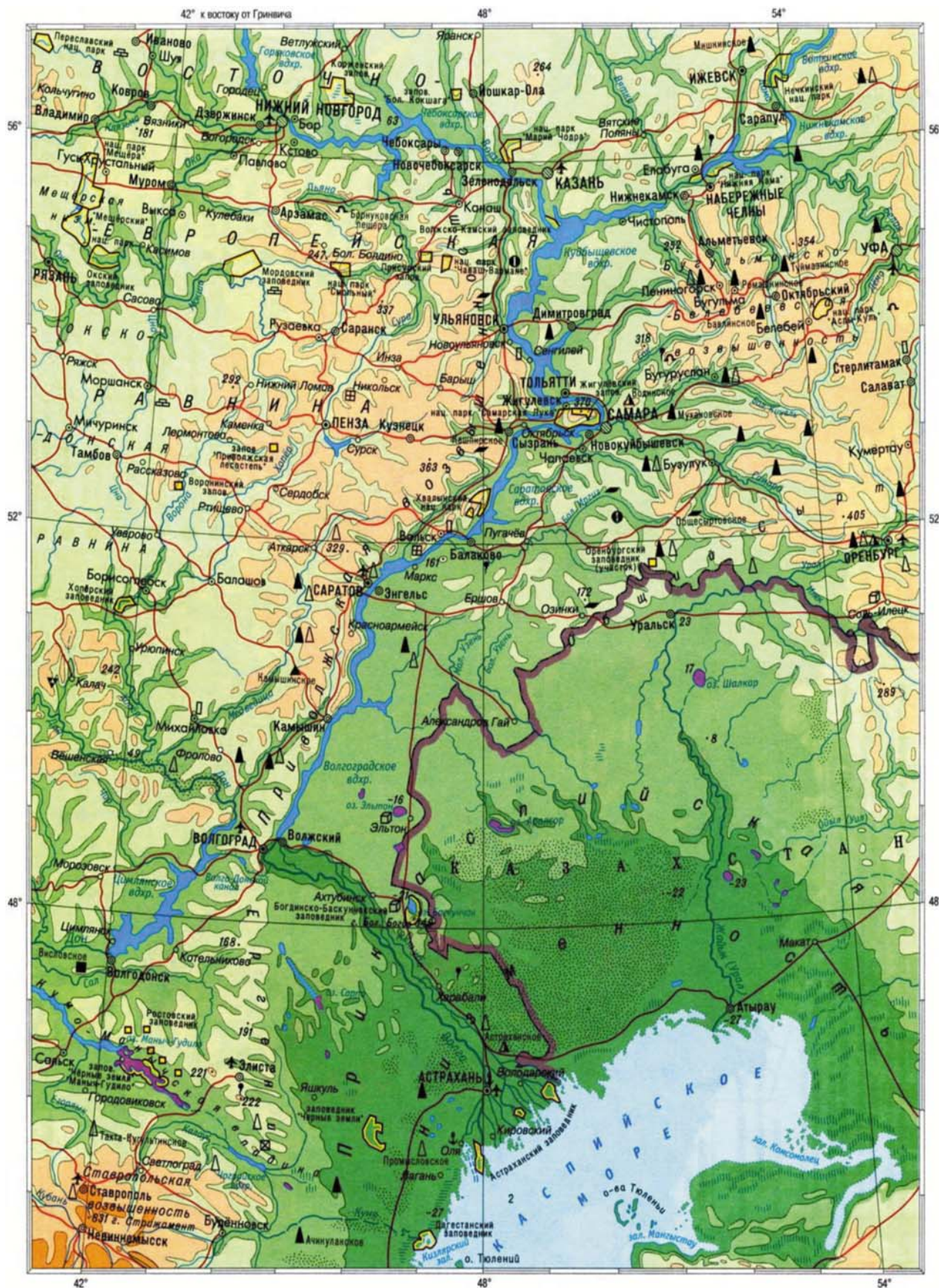
Актуальность выбранной темы исследования обусловлена тем, что до сих пор остается спорным вопрос о вторичности всех типов березового леса на Приволжской возвышенности в связи с сильной измененностью современного растительного покрова изучаемой территории. Некоторые авторы считали возможным развитие березовых лесов на данной территории до хозяйственной деятельности человека [Спрыгин, 1931; Фурсаев, 1952; Плетнева-Соколова, 1959; Хржановский, Соколова-Доманская, 1962; Шаландина, 1993; Болдырев, 2006; Дворников, Чашин, 2010; Сенатор, 2017]. Другие считают их вторичными типами леса [Цепляев, 1961; Димитриев и др., 1993; Смирнова, Торопова, 2004; Благовещенский, 2005; Леонова, 2014, 2016; Малышева, 2018; Кудрявцев, 2022, 2023]. По их мнению, если в районах распространения березовых лесов и встречаются ландшафты, внешне напоминающие березовые лесостепи Зауралья и Урала, то это результат исключительно деятельности человека.

Накопленный нами ранее материал по палинологии, палеоэкологии и палеогеографии [Благовещенская, 2016, 2020], а также современные геоботанические исследования легли в основу восстановления основных этапов формирования березовых сообществ и обзора их современного состояния на изучаемой территории.

Материалы и методы

С геоморфологической точки зрения Приволжская возвышенность представляет собой часть Русской равнины, расположенную на правом берегу Волги (рис.). Западные и северные территории входят в подзону широколиственных лесов широколиственной лесной зоны, а восточные и южные – в подзону лесостепи широколиственной лесной зоны [Сафронова и др., 1999].

Для палеоботанических реконструкций были использованы данные спорово-пыльцевого анализа 54 разрезов торфяных болот, расположенных относительно равномерно на всей территории Приволжской возвышенности в различных ландшафтных и палинологических районах.



Карта Приволжской возвышенности
Map of the Volga Upland

При интерпретации полученных данных учитывались сублокальные, локальные, региональные компоненты спорово-пыльцевых спектров, а также физико-географические особенности района расположения каждого торфяного разреза. Основные корреляционные палинологические уровни с радиоуглеродными датами приведены нами ранее [Благовещенская, 2019].

Средние спорово-пыльцевые комплексы всей изучаемой территории представлены в таблице. Для их расчета использована методика, предложенная ранее [Елина, 1981; Филимонова, 1995].

Для геоботанических исследований использованы стандартные методы описания лесных сообществ как в индивидуальных выездах, так и в составе экспедиций.

Результаты и обсуждение

Основные этапы формирования березовых лесов. На основании анализа полученных спорово-пыльцевых и радиоуглеродных данных 54 голоценовых торфяных и минералогенных разрезов болот, а также обобщенных средних спорово-пыльцевых диаграмм различных палинологических районов [Благовещенская, 2019] и средних спорово-пыльцевых комплексов всей территории (табл.) нами восстановлена лесообразующая роль *Betula sect. Albae* на Приволжской возвышенности.

Впервые пыльца *Betula sect. Albae* встречена нами в минералогенных отложениях, которые относятся к рубежу позднего дриаса и пребореального периода (около 10 300 л. н.) (табл.). Причем в спорово-пыльцевых спектрах

Средние спорово-пыльцевые комплексы голоценовых отложений Приволжской возвышенности, %
Average spore-pollen complexes of the Holocene deposits of the Volga Upland, %

Растения Plants	Возраст, лет назад Age, years ago					
	2500–0	3200–2500	6000–3200	8000–6000	9300–8000	10300–9300
Деревья: Trees:	41,0	44,0	51,5	42,0	26,5	12,0
<i>Picea abies</i> L.	3,0	1,5	2,0	1,0	0	0
<i>Pinus sylvestris</i> L.	59,0	52,0	43,5	44,0	44,5	22,0
<i>Betula sect. Albae</i>	29,0	24,0	28,0	44,0	30,0	18,0
<i>B. humilis</i> Schrank.	0	0	0	0,5	3,0	10,0
<i>Quercus robur</i> L.	3,5	3,5	6,5	2,0	0	0
<i>Tilia cordata</i> Mill.	2,5	2,5	4,0	1,0	0	0
<i>Ulmus</i> spp. L.	1,0	2,0	3,0	0,5	0	0
Всего широколиственных пород Total broadleaf species Quercetum mixtum	7,0	8,0	14,0	4,0	0	0
<i>Alnus</i> spp. Mill.	5,0	5,5	7,5	4,0	0,2	0
<i>Corylus avellana</i> L.	2,0	4,0	4,0	1,5	0	0
<i>Acer</i> spp. L.	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
<i>Salix</i> spp. L.	3,5	3,5	2,0	2,5	25,5	50,0
Травы: Herbs:	36,5	30,5	26,5	27,5	44,5	74,0
Poaceae	27,0	28,0	25,0	24,0	18,5	10,5
Cyperaceae	31,0	23,0	28,0	24,0	22,0	6,2
<i>Artemisia</i> spp. L.	12,0	14,0	11,5	11,0	21,5	45,0
Chenopodiaceae	6,0	7,0	6,0	8,0	23,0	37,2
сорные травы weeds	9,0	2,0	0	0	0	0
Ericaceae	1,0	1,0	1,0	0,5	0	0
Varia	13,0	14,5	17,0	31,0	12,0	0
Споровые: Spore:	22,5	25,5	22,0	30,5	29,0	14,0
<i>Sphagnum</i> sp. L.	23,0	27,0	22,0	10,0	0,5	0
Bryales	64,0	61,0	60,5	60,0	40,5	23,0
Polypodiopsida	9,0	11,0	16	27,5	40,5	32,0
<i>Equisetum</i> sp. L.	2,5	1,0	1,0	2,0	18,5	45,0
<i>Lycopodium</i> sp. L.	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0

значительная доля приходится на пыльцу березы приземистой (*Betula humilis* Schrank.), что дает основание говорить о ее существенной роли в сложении ценозов тундростепи, распространенной в это время на всей территории Приволжской возвышенности [Климанов и др., 1995; Благовещенская, 2019]. Необходимо отметить, что береза приземистая в настоящее время встречается здесь крайне редко во влажных местообитаниях пойменных и водораздельных болот (во всех областях исследуемой территории занесена в региональные Красные книги).

Несмотря на то что древний человек появился на территории Приволжской возвышенности в палеолите, воздействие на природу в это время было пассивным (сбор растений, случайные пожары от костров), существенных изменений в растительном покрове не происходило. По данным археологов [Халиков, 1969], верхнепалеолитические племена насчитывали не более 1 тысячи людей на территории всего Среднего Поволжья.

В бореальном периоде (9300–8000 л. н.) в связи с потеплением климата более существенную роль в древесных сообществах стали играть береза повислая (*Betula pendula* Roth) и береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), пыльцу которых мы объединили в одну секцию – *Betula sect. Albae* (табл.). Если учесть содержание пыльцы сосны в отложениях этого времени (всего около 20 % при поправочном коэффициенте около 0,2 [Благовещенская, 2016]), можно с большой долей вероятности предположить значительное развитие березовых колок с разреженным подлеском и травяным ярусом из злаков. На широкое распространение в раннем голоцене березовых и сосново-березовых лесов в Предуралье (располагающемся восточнее исследуемой территории) указывали многие исследователи [Шаландина, 1993; Пахомова, 2004; Лаптева, 2007; Дворников, Чашин, 2010].

Именно в это время (около 9500–8500 л. н.) сформировались и березовые леса заболоченные [Благовещенская, Чернышев, 2012; Благовещенская, Благовещенский, 2019] – вначале на пойменных болотах, образуя впоследствии залежи низинного типа, лесного и лесо-топяного подтипов, березового, древесно-осокового, древесно-тростникового, топяно-лесного, лесо-топяного, многослойного лесо-топяного видов [Тюремнов, 1976]. Судя по ботаническому составу торфов, заболоченные березняки были представлены березово-тростниковыми (самые древние возрастом около 9500 л. н.) и березово-осоковыми сообществами (*Betula*

pubescens, *B. humilis*, *Carex cespitosa* L., *C. rostrata* Stokes, *C. diandra* Schrank, *C. atherodes* Spreng., *C. appropinquata* Schum., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. с небольшой примесью *Equisetum* sp. и зеленых мхов).

Данное время (пребореальный и бореальный периоды голоцена) относится к эпохе мезолита [Дворников, Чашин, 2010]. Заселение происходило в надпойменных террасах р. Волги. Основным занятием племен была охота. Своей хозяйственной деятельностью они крайне мало влияли на состояние окружающих редкостойных березовых колок. Численность людей на территории всего Среднего Поволжья составляла 2–3 тысячи. На пыльцевых диаграммах этих периодов не отмечено следов деятельности человека [Благовещенская, 2009].

В первой половине атлантического периода (8000–6000 л. н.) похолодание климата и повышение уровня грунтовых вод [Климанов и др., 1995] способствовали еще большему облесению территории с равным или даже более значительным участием березы по сравнению с сосной (табл.). Судя по пыльцевым спектрам отложений многих болот [Чигуряева, Воронина, 1970; Шаландина, 1993; Сенатор, 2017; Благовещенская, 2020], были распространены сосново-березовые леса и березняки остепненные (особенно на супесчаных и песчаных почвах верхнего плато).

«Березовую» фазу в развитии лесов в раннеатлантическое время выделяли также исследователи более северных и западных территорий, в частности Среднерусской возвышенности [Хмелев, 1979; Носова, 2008; Борисова, 2014; Чепурная, Новенко, 2015; Новенко, 2016].

Раннеатлантический период относится к эпохе неолита (около 6500 л. н.). На исследуемой территории обнаружены многочисленные неолитические стоянки человека [Буров, 1972]. В лесах появляются сорные виды, что нашло свое отражение и в спорово-пыльцевых комплексах: единично появляется пыльца рудеральных сорняков [Благовещенская, 2009]. Однако плотность населения хотя и возросла до 0,08 чел./км² [Дворников, Чашин, 2010], но по-прежнему оставалась крайне низкой, чтобы существенно влиять на структуру лесных сообществ.

Со второй половины атлантического и до середины суббореального периодов (6000–3200 л. н.) – в климатический оптимум голоцена – увеличение влажности и значительное потепление на данной территории привели к повсеместному и широкому формированию не только широколиственных и сосново-широколиственных лесов, но и к распространению

березовых лесов дубравных. Судя по спорово-пыльцевым спектрам, значительную роль в них играла липа, с подлеском из *Sorbus aucuparia* L., *Euonymus verrucosa* Scop., *Corylus avellana* L. и обилием *Cyperaceae* в травяном ярусе. Более всего они были распространены (как и в настоящее время) на выровненных склонах водоразделов с плодородными суглинистыми почвами.

В районах распространения болотных массивов и заболоченных почв самое большое развитие (за весь голоцен) получили березняки заболоченные. Именно к этому времени приурочено образование большинства пойменных и водораздельных болот [Благовещенская, Благовещенский, 2019, 2023].

В составе заболоченных березняков на плакорах всегда присутствовали *Salix* spp., *Alnus* spp., иногда *Quercus robur* L. а из трав – *Polytrichum* spp., *Carex* spp., *Calamagrostis* spp., *Filipendula* spp. На пойменных болотах были распространены те же сообщества, что и вбореальном периоде (березово-осоковые, березово-тростниковые).

На водораздельных болотах, вокруг озер, в суффозионных понижениях водоразделов заболоченные березняки в это время (от 6 000 до 4 500 л. н.) были представлены березово-осоковыми ценозами (*Betula pubescens*, *Carex vesicaria* L.). Небольшую роль играли эвтрофные сфагновые мхи (*Sphagnum subsecundum* Nees.). Данные сообщества впоследствии образовали залежи переходного типа, лесотопяного и топяного подтипов с характерным чередованием лесных, лесотопяных и топяных переходных торфов. В основании залежей, как правило, залегают значительной мощности слои древесно-осокового переходного, сосново-сфагнового верхового, древесно-осокового низинного, березового торфов [Благовещенская, Благовещенский, 2023].

Данное время на территории Приволжской возвышенности – эпоха позднего неолита – представлено лишь единичными археологическими памятниками. По мнению большинства авторов, основными занятиями людей неолита по-прежнему были рыболовство и охота, намного меньше – начавшееся скотоводство [Мерперт, 1958; Халиков, 1969; Буров, 1972; Дворников, Чашин, 2010]. В целом, однако, нельзя сказать, что возникшие в конце неолита антропогенные изменения в растительности были настолько существенными, что приводили к необратимым сукцессиям.

Похолодание климата [Климанов и др., 1995] в конце суббореального периода (3200–2500 л. н.) привело к сокращению площадей, занятых широколиственными лесами и

дубравными березняками, и к расширению роли сосновых ценозов. Тем не менее в их составе береза по-прежнему встречалась в виде единичных деревьев (табл.).

На водораздельных болотах снижение уровня грунтовых вод в это время привело к развитию березово-пушицево-сфагновых ценозов (*Betula pubescens*, *B. humilis*, *Eriophorum polystachyon* L., *Sphagnum centrale* C. E. O. Jensen, *S. subsecundum*, *S. angustifolium* C. E. O. Jensen). Однако в конце суббореального периода (около 2 500 л. н.) с повышением уровня грунтовых вод и установлением обильного и малопроточного водного режима на болотах указанные сообщества сменились осоково-сфагновыми (*Carex lasiocarpa* Ehrh., *C. limosa* L., *Sphagnum centrale*) или сфагновыми (*Sphagnum centrale*, *S. flexuosum* Dozy & Molk., *S. subsecundum*, *S. fallax* (H. Klinggr.) H. Klinggr.) мезотрофными сообществами с небольшим участием березы.

В современной классификации болотных массивов, разработанной И. В. Благовещенским [2006б] для центральной части Приволжской возвышенности, подобные сообщества с древесно-осоковой залежью характерны для березово-волосистоплодноосоково-сфагнового и ивово-березово-осоково-разнотравного видов болотных массивов и довольно широко представлены в междюнных понижениях рек Суры и Барыша.

С наступлением в это время эпохи бронзы антропогенное воздействие на растительный покров резко возросло. По мнению Н. Я. Мерперта [1958], именно к эпохе бронзы относится массовое, сплошное заселение Среднего Поволжья. Проведенные раскопки выявили десятки поселений бронзового века. Преимущественным занятием племен было скотоводство и земледелие. В основном господствовали племена срубной культуры [Буров, 1972, 1974]. Усилившийся выпас приводил к еще большим нарушениям в лесу, чем в предыдущем периоде. На пыльцевых диаграммах это нашло свое отражение в увеличении видового состава и процентного участия пастбищных видов [Благовещенская, 2009].

В субатлантическом периоде (2500 л. н. – настоящее время) уже невозможно представить лесообразующую роль березы без учета антропогенного воздействия. Начиная с раннесубатлантического времени (2500–700 л. н.) за счет начавшегося интенсивного земледелия и вырубки лесов в «эпоху железа» впервые начинает сокращаться площадь лесов. Об этом свидетельствует резко возросшее участие пыльцы сорных растений и культурных злаков в пыльцевых спектрах [Благовещенская, 2009].

Плотность населения возрастает до 40 чел./км² [Халиков, 1969]. Выпас скота в лесах приводил к их остепнению и изреживанию, уничтожению естественного травяного покрова и засорению пастбищными видами.

Вырубка лесов, распашка территорий способствовали смене коренных (условно коренных, первичных) типов леса вторичными, среди которых широко представлены сообщества с березой порослевого происхождения. Из наиболее распространенных лесных сообществ в настоящее время на Приволжской возвышенности следует указать: березовые леса травяные, сосново-березовые коротконожково-вейниковые, круглолистногрушанковые, кошачьялапковые.

В результате осушения многих пойменных болотных массивов произошла смена осоковых сообществ древесно-осоковыми, как правило, с пушицей. Болота с подобными видами залежей по современной классификации соответствуют березово-разнотравному виду болотных массивов и в настоящее время встречаются очень широко [Благовещенский, 2006б].

На водораздельных болотах в последние годы в связи с осушением некоторых участков под торфоразработки и периодически возникающими пожарами роль березовых древостоев значительно увеличилась, а в травяном ярусе появилась пушица.

С середины субатлантического периода (700–300 л. н.) начинается массовое сведение лесов на хозяйственные и строительные нужды. В это время на данной территории сложилось государство волжских булгар, основным занятием которых было хорошо развитое земледелие и оседлое скотоводство, и в результате возрастает роль вторичных порослевых сообществ березовых лесов.

Современное состояние березовых лесов. Березовые древостои Приволжской возвышенности сложены березой повислой (*Betula pendula*) и березой пушистой (*Betula pubescens*) и образуют следующие сообщества: *Betuleta herbosa*, *Betuleta nemorosa*, *Betuleta hylocomiosa*, *Betuleta uliginosa*, *Betuleta substepposa*. Кроме этого, порода часто значительно представлена в составе сосново-березовых, сосново-широколиственных и смешанных лесов. Ее участие в составе современных лесов в среднем 16,5 %. Причем наибольшие показатели – в западных, северных и северо-западных регионах (от 20 до 25 %), наименьшие – в северо-восточных, восточных и южных (от 4,5 до 13 %) [Благовещенская, 2016].

Таким образом, в современном растительном покрове Приволжской возвышенности

удельный вес березовых лесов достаточно велик, причем по направлению с севера на юг он заметно снижается. Так, в Чувашии леса с господством березы составляют 20,9 %, а в Ульяновской области – 13,8 %. Еще южнее – на саратовском правобережье Волги – участие березовых лесов невелико, они встречаются отдельными вкраплениями. Данный тип леса в основном приурочен к палеогеновым отложениям верхнего и нижнего плато центральной части Приволжской возвышенности и к древним ложбинам стока с древнеаллювиальными песками. В районе Жигулевских гор березовые леса встречаются лишь небольшими вкраплениями [Семенова-Тян-Шанская, 1957; Благовещенский, 2005].

В отношении гидрологического режима березовые леса отличаются широкой экологической амплитудой: они занимают и достаточно сухие местообитания, где грунтовые воды находятся глубоко, и места с близким расположением грунтовых вод и даже в той или иной степени заболоченные.

Что касается рельефа, то в северной и центральной частях Приволжской возвышенности березовые леса занимают главным образом плато водоразделов, но на саратовском правобережье Волги они распространены преимущественно по склонам северной экспозиции [Малышева, 2018; Кудрявцев, 2023].

Дубравные березовые леса (*Betuleta nemorosa*) в настоящее время занимают большие площади плато и пологих склонов водоразделов с супесчаными и суглинистыми почвами. В подлеске, как правило, встречается лещина (*Corylus avellana*), рябина (*Sorbus acuparia*), бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosa*). Эти местообитания не отличаются очень близким расположением уровня грунтовых вод, поэтому в травяном покрове редки гигрофитные виды. Он образован типичными дубравными видами с доминантом *Carex pilosa* Scop. и содоминантом *Aegopodium podagraria* L. По мнению некоторых исследователей, дубравные березняки вторичны – появляются преимущественно на месте вторичных дубняков, сосново-дубовых, сосново-липовых и липовых лесов [Цепляев, 1961; Благовещенский, 2005; Леонова, 2016; Кудрявцев, 2022]. Однако существует и вполне обоснованное, на наш взгляд, мнение о первичности данных сообществ и их существовании в доагрикультурное время [Исаев, 2013; Благовещенская, 2020]. Полученные нами палинологические данные по истории формирования березовых лесов также подтверждают это мнение.

Дубравные березняки тоже представлены целым рядом ассоциаций, отличающихся разным удельным весом в растительном покрове. Одна из наиболее распространенных – березняк волосистоосоковый (*Betuletum caricosum pilosae*). Обычно занимает выровненные участки плато водоразделов с серыми лесными почвами от легкосупесчаных до легкосуглинистых. Ярус подлеска здесь разрежен, а в травяном ярусе доминирует осока волосистая (*Carex pilosa*). Изредка отмечаются другие дубравные виды (*Aegopodium podagraria*, *Pulmonaria obscura* Dumort., *Asarum europaeum* L., *Lathyrus vernus* (L.) Bernh., *Rubus saxatilis* L., *Carex rhizina* Blytt ex Lindbl., *Galium mollugo* L., *G. boreale* L., *Viola mirabilis* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth., *Vicia sepium* L. и др.).

Реже встречаются березовые сообщества других ассоциаций: липо-березняк коротконожково-волосистоосоковый – *Tilieto-Betuletum brachypodioso-caricosum pilosae*; дубо-березняк волосистоосоковый – *Querceto-Betuletum caricosum pilosae*, липо-березняк волосистоосоковый – *Tilieto-Betuletum caricosum pilosae*; березняк снытево-волосистоосоковый – *Betuletum aegopodioso-caricosum pilosae*.

Березовые леса заболоченные (*Betuleta uliginosa*) – широко и повсеместно распространенные сообщества в центральной части Приволжской возвышенности, а южнее, на саратовском правом берегу Волги, эти леса не встречаются. Приурочены к небольшим плоским понижениям на выровненных плато водоразделов. Иногда они занимают очень большие площади (в соответствии с площадью таких понижений), образуя пойменные и водораздельные болотные массивы, но чаще представлены более или менее крупными островами среди других лесных ассоциаций. Почва в заболоченных березняках слабоподзолистая, супесчаная, иногда легкосуглинистая или представлена торфом.

По мнению большинства исследователей, заболоченные березняки – коренные сообщества Приволжской возвышенности [Чигуряева, Воронина, 1970; Благовещенская, Благовещенский, 2019, 2023; Благовещенский, 2020], что подтверждается и нашими исследованиями. Однако существует мнение, что многие из них образовались на месте первичных сосново-березовых заболоченных лесов после вырубок [Цепляев, 1961; Благовещенский, 2005].

Необходимо отметить, что в зависимости от условий местообитания березняки заболоченные отличаются большим разнообразием. На пойменных болотах имеют ограниченное распространение, встречаясь, как правило,

в условиях более бедного минерального питания, чем в поймах или лесных балках. Древоустой образован березой пушистой (*Betula pubescens*). Ярус подлеска или не выражен, или сильно разрежен, но характерным является встречаемость здесь гигрофитных древесных растений – различных видов *Salix* spp., *Frangula alnus* Mill. и иногда *Alnus glutinosa* Gaertn. Травяной ярус образован почти исключительно гигрофитными видами. Доминируют в травяном покрове различные осоки (в основном *Carex cespitosa* L., *C. riparia* Curt., встречаются в обилии и другие гигрофитные виды: *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim, *Phragmites australis*, *Molinia coerulea* (L.) Moench, *Geum rivale* L., *Humulus lupulus* L., *Potentilla erecta* (L.) Raeusch., *Veratrum lobelianum* Bernh., *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv. и целый ряд папоротников (*Athyrium filix-femina* (L.) Roth., *Dryopteris cristata* (L.) A. Gray., *Thelypteris palustris* Schott. и др.). Мхи встречаются в виде подушек в основании стволов деревьев (*Climacium dendroides* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr., *Calliergon cordifolium* (Hedw.) Kindb., *Mnium* spp., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.).

Заболоченные березовые леса водоразделов, напротив, имеют широкое распространение. Наиболее представлены березово-пушицевые сообщества, иногда с небольшим участием сосны (*Pinus sylvestris* L.). Часто они образуют растительный покров целых болотных массивов.

По данным Благовещенского [2006а, б], для болотных березняков типичны ценозы из *Eriophorum vaginatum* L., *Vaccinium myrtillus* L., *V. uliginosum* L., *V. vitis-idaea* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *C. lasiocarpa* Ehrh., *Menyanthes trifoliata* L., *Naumburgia thyrsoflora* (L.) Reichenb., *Thyselium palustre* (L.) Rafin., *Thelypteris palustris*. Моховой покров может быть как почти не выраженным, так и сплошным из сфагновых и зеленых мхов: *Sphagnum angustifolium* (C. E. O. Jensen ex Russow) C. E. O. Jensen, *S. fallax* (H. Klinggr.) H. Klinggr., *S. magellanicum* Brid., *S. centrale* C. E. O. Jensen, *S. squarrosum* Crome, *S. warnstorffii* Russow, *Polytrichum commune* Hedw., *Dicranum polysetum* Sw., *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwägr., *Calliergon cordifolium* и др.

Заболоченные березовые леса [по: Благовещенский, 2006б] относятся к двум ассоциациям: *Pino-Betulo pubescentis-Sphagnetum angustifolii* (Filatov et Yurev 1913) Smagin, 2000; *Carici lasiocarpae-Betulo pubescentis-Sphagnetum* (Kaks 1914) Blagov, 2006.

Березовые леса остепненные (*Betuleta substepposa*) распространены на Приволжской

возвышенности относительно редко, в южных районах, как правило, на склонах с глубоким залеганием грунтовых вод. Несколько чаще их можно видеть южнее – на саратовском правобережье Волги, где они тоже представлены лишь небольшими участками [Фурсаев, 1952]. Кроме того, отдельные острова остепненных березняков имеются также в Жигулях [Семенова-Тян-Шанская, 1957]. По мнению большинства исследователей [Цепляев, 1961; Благовещенский, 2005; Леонова, 2014, 2016; Кудрявцев, 2022, 2023], остепненные березняки Приволжской возвышенности имеют вторичное происхождение – на месте сосняков-зеленомошников и сосново-дубовых лесов (на супесчаных почвах), что не согласуется с полученными нами палинологическими данными по истории формирования березовых сообществ.

В настоящее время на Приволжской возвышенности они представлены лишь одной ассоциацией – березняком узколистно-мятликовым (*Betuletum roeosum angustifoliae*). Сомкнутость крон здесь всего 0,2–0,4, причем почвы обычно легкие – легкосупесчаные и даже песчаные. Основной доминантой травяного яруса является мятлик узколистный (*Poa angustifolia* L.), к нему иногда может примешиваться типчак (*Festuca valesiaca* Gaudin.), лабазник шестилепестной (*Filipendula vulgaris* Gilib) и много других лугово-степных видов.

Березовые леса-зеленомошники (*Betuleta hylocomiosa*) – довольно редкие сообщества, встречаются иногда на легких супесчаных почвах по древним ложбинам стока, еще реже – по верхнему плато.

Такие березовые леса, сохранившие специфические черты сосновых лесов-зеленомошников, сформировались в результате вырубок последних. В подобных лесных сообществах боровые виды не только многочисленны, но некоторые из них продолжают доминировать (например, *Vaccinium vitis idaea* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Pyrola rotundifolia* L.). В той или иной степени развит и моховой ярус из зеленых мхов.

На Приволжской возвышенности в основном встречаются следующие ассоциации, приуроченные, как правило, к местообитаниям с близким залеганием грунтовых вод: березняк-черничник – *Betuletum myrtillosum*, березняк круглолистно-грушанковый – *Betuletum pyroliosum rotundifoliae*, березняк-брусничник – *Betuletum vaccinosum*.

Березовые леса травяные (*Betuleta herbosa*) – наиболее широко распространенное сообщество березняков, представлено, как правило, большими осветленными

лесными массивами. Подлесок здесь или совсем отсутствует, или очень разрежен, что также способствует увеличению доступа света под полог деревьев. В результате травяной ярус получает хорошее развитие, он образован светолюбивыми травянистыми растениями, причем чаще всего основная роль принадлежит мезофитным злакам [Исаев, 2013, 2014].

По мнению большинства исследователей [Благовещенский, 2005; Благовещенский и др., 2014; Леонова, 2014, 2016; Сенатор, 2017; Малышева, 2018; Кудрявцев, 2023] и по нашим палинологическим данным, травяные березняки в большинстве случаев появляются после рубок сосновых лесов-зеленомошников, сосново-дубовых лесов, а также вторичных травяных дубняков и, независимо от происхождения, по составу существенно не отличаются. В древостое этих березняков очень часто имеется примесь сосны, дуба (иногда и липы), а в травяном ярусе обычны боровые виды (*Orthilia secunda* (L.) Garcke, *Pyrola rotundifolia* L., *Majanthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt и др.). Некоторые из них часто в большом обилии (*Potentilla erecta*, *Succisa pratensis* Moench., *Molinia coerulea*, *Sanguisorba officinalis* L.).

Травяные березовые леса достаточно разнообразны, они представлены целым рядом ассоциаций: березняк коротконожковый – *Betuletum brachypodiosum* (самая распространенная); березняк марьянниковый – *Betuletum melampyrosum*; березняк земляничный – *Betuletum fragariosum* (редко встречающаяся); березняк дубравно-мятликовый – *Betuletum roeosum nemoralis* (характерна только для саратовского правобережья Волги); березняк пальчато-осоковый – *Betuletum caricosum digitatae* (характерна для северной части саратовского правобережья Волги).

Заключение

Полученные данные свидетельствуют о значительной роли березы в формировании лесных ценозов Приволжской возвышенности как в доагрикультурное время, так и после начала антропогенного воздействия на растительность. Некоторые березовые сообщества сформировались в древнейшие времена, и их следует признать коренными, доагрикультурными, те же, что возникли в результате хозяйственного освоения, справедливо считать производными, вторичными.

Самое большое участие *Betula sect Albae* было от 8000 до 6000 л. н., когда порода формировала сосново-березовые и чистые березовые остепненные леса, березняки заболоченные.

С 6000 до 3200 л. н. она не только играла равную роль в сосново-березовых лесах, но и повсеместно образовывала березовые леса дубравные.

Если эти два этапа связаны с естественными климатическими, гидрологическими, эдафическими и ландшафтными причинами, то последний, третий этап расширения березовых древостоев – начиная с 2500 л. н. – во многом объясняется начавшейся интенсивной антропогенной деятельностью, приведшей к образованию вторичных березняков.

Таким образом, на основании проведенных палеогеографических реконструкций и современного анализа распространения березовых сообществ коренными (условно-коренными, первичными, доагрикультурными) на Приволжской возвышенности следует считать современные березовые сообщества групп ассоциаций: березовые леса дубравные (*Betuleta nemorosa*); березовые леса заболоченные (*Betuleta uliginosa*); березовые леса остепненные (*Betuleta substepposa*).

Производными (вторичными) следует признать березовые леса зеленомошники (*Betuleta hylocomiosa*) и травяные (*Betuleta herbosa*). В сосново-березовых сообществах это коротконожково-вейниковые (*Pinetum betuleto calamagrostidoso-brachypodiosum*); круглолистногогрушанковые (*Pinetum betuleto pyroliosum rotundifoliae*); кощачьелапковые (*Pinetum betuleto-antennariosum*) и сероватовейниковые (*Pinetum betuleto-calamagrostidosum canescens*).

Литература

- Благовещенская Н. В.* Динамика растительного покрова центральной части Приволжской возвышенности в голоцене. Ульяновск: УлГУ, 2009. 283 с.
- Благовещенская Н. В.* Взаимоотношения леса и степи на юге Приволжской возвышенности в голоцене // *Экология*. 2020. № 1. С. 36–42. doi: 10.31857/S0367059720010035
- Благовещенская Н. В.* Особенности интерпретации субфоссильных спорово-пыльцевых спектров Приволжской возвышенности (в целях палеоботанических реконструкций) // *Бюл. МОИП*. 2016. Т. 5, № 121. С. 48–63.
- Благовещенская Н. В.* Лесорастительные зоны центральной части Приволжской возвышенности в голоцене и их корреляция с сопредельными регионами // *Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки*. 2019. Т. 161, кн. 1. С. 108–128. doi: 10.26907/2542-064X.2019.1
- Благовещенский И. В., Благовещенская Н. В., Исаева Т. Н.* Коренные лесные сообщества запада центральной части Приволжской возвышенности // *Вестник Саратовского государственного университета им. Н. И. Вавилова*. 2014. № 4. С. 9–14.
- Благовещенская Н. В., Благовещенский И. В.* Динамика растительного покрова пойменных болот Приволжской возвышенности в голоцене // *X Галкинские чтения: Мат-лы конф. (Санкт-Петербург, 4–6 февраля 2019 г.)*. СПб., 2019. С. 19–23.
- Благовещенская Н. В., Благовещенский И. В.* Стратиграфия и эволюция растительного покрова водораздельных болот Приволжской возвышенности // *XII Галкинские чтения – Типы болот России: Мат-лы конф. (Санкт-Петербург, 3 февраля 2023 г.)*. СПб., 2023. С. 17–20.
- Благовещенская Н. В., Чернышев А. В.* Динамика болотных экосистем Приволжской возвышенности // *Известия РАН. Сер. геогр.* 2012. № 2. С. 124–131.
- Благовещенский И. В.* Болотные березняки центральной части Приволжской возвышенности // *Ботанический журнал*. 2006а. Т. 91, № 3. С. 425–445.
- Благовещенский И. В.* Структура растительного покрова, систематический, географический и эколого-биологический анализ флоры болотных экосистем центральной части Приволжской возвышенности: Дис. ... д-ра биол. наук. Ульяновск, 2006б. 495 с.
- Благовещенский И. В.* Структура растительности болотных экосистем центральной части Приволжской возвышенности. Ульяновск: УлГУ, 2020. 271 с.
- Благовещенский В. В.* Растительность Приволжской возвышенности в связи с ее историей и рациональным использованием. Ульяновск: УлГУ, 2005. 715 с.
- Болдырев В. А.* Структура и продуктивность лесов южной части Приволжской возвышенности // *Лесоведение*. 2006. № 6. С. 27–33.
- Борисова О. К.* Изменения растительности и климата в центральном регионе Русской равнины в голоцене: к проблеме участия граба в лесных сообществах // *Природная среда и модели адаптации озерных поселений в мезолите и неолите лесной зоны Восточной Европы: Мат-лы Междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 19–21 мая 2014 г.)*. СПб.: ИИМК РАН, 2014. С. 37–40.
- Буров Г. М.* Археологические памятники Верхней Свияги. Ульяновск: Приволжское изд-во, 1972. 56 с.
- Буров Г. М.* Курганы Бронзового века близ Ульяновска. Ульяновск: Приволжское изд-во, 1974. 68 с.
- Дворников М. Г., Чащин П. В.* Динамика экосистем северо-востока Волжского бассейна в голоцене // *Известия Самарского НЦ РАН*. 2010. Т. 12, № 1. С. 21–26.
- Димитриев А. В., Ефейкин Д. П., Краснов Н. А.* Тенденции изменения динамики растительного покрова Приволжской части Чувашской республики // *Самарская Лука*. 1993. № 4(93). С. 91–93.
- Елина Г. А.* Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена. Л.: Наука, 1981. 180 с.
- Исаев И. Е.* Некоторые показатели экологической продуктивности молодняков лесных насаждений Ульяновской области // *Вестник Саратовского государственного университета им. Н. И. Вавилова*. 2013. № 9. С. 12–15.
- Исаев И. Е.* Фитоценотическая структура и экологические особенности молодняков Ульяновской области: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ульяновск, 2014. 24 с.

Климанов В. А., Хотинский Н. А., Благовещенская Н. В. Колебания климата за исторический период в центре Русской равнины // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 1. С. 89–96.

Кудрявцев А. Ю. Динамика экосистем свежей субори центра Приволжской возвышенности // Поволжский экологический журнал. 2022. № 3. С. 279–291. doi: 10.35885/1684-7318-2022-3-279-291

Кудрявцев А. Ю. Динамика экосистем свежего бора центра Приволжской возвышенности // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 3. С. 49–58. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-049-058

Лаптева Е. Г. Развитие растительности и климата восточного склона Урала во второй половине позднего неоплейстоцена и в голоцене: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2007. 24 с.

Леонова Н. А. История антропогенного преобразования растительного покрова лесостепных ландшафтов западных склонов Приволжской возвышенности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2016. № 4(16). С. 23–37. doi: 10.21685/2307-9150-2016-4-3

Леонова Н. А. Пространственно-временная трансформация растительности верхнего плато Приволжской возвышенности (в пределах Пензенской области) // Фундаментальные исследования. 2014. № 9(1). С. 81–85.

Мальшева Г. С. Взаимоотношения леса и степи на Приволжской возвышенности (в порядке дискуссии) // Phytodiversity of Eastern Europe. 2018. XII(2). С. 170–188.

Мерперт Н. Я. Из древнейшей истории Среднего Поволжья // Труды Куйбышевской археологической экспедиции. М., 1958. Т. 2. С. 45–156.

Новенко Е. Ю. Растительность и климат Центральной и Восточной Европы в позднем плейстоцене и голоцене: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М., 2016. 50 с.

Носова М. Б. История лесной растительности Центрально-Лесного государственного заповедника в голоцене: по данным спорово-пыльцевого анализа: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 22 с.

Пахомова О. М. История растительности Вятско-Камского Предуралья в позднем плейстоцене и голоцене: по материалам спорово-пыльцевого анализа: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2004. 22 с.

Плетнева-Соколова А. Д. Сурско-Волжские леса Чувашии за четверть века (1928–1953) // Труды Чувашского сельскохозяйственного института. 1959. Т. 4. С. 9–44.

Сафронова И. Н., Юрковская Т. К., Микляева И. М., Огуреева Г. Н. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий: Карта М 1:8 000 000. М., 1999. 64 с.

Семенова Тянь-Шанская А. М. Материалы к распределению сосновых лесов Приволжья // Труды Бот. ин-та АН СССР. Сер. 3. Геоботаника. 1957. Вып. 11. С. 309–338.

Сенатор С. А. Растительный покров Среднего Поволжья в голоцене // Самарская Лука: Проблемы региональной и глобальной экологии. 2017. Т. 26, № 2. С. 73–81.

Смирнова О. В., Торопова Н. А. Основные черты популяционной биологии растений (эдификаторов и ассектаторов) современного лесного пояса // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. М.: Наука, 2004. С. 154–165.

Спрыгин И. И. Растительный покров Средневожского края. Самара-М., 1931. 66 с.

Тюремнов С. Н. Торфяные месторождения. М.: Недра, 1976. 487 с.

Филимонова Л. В. Стандартные спорово-пыльцевые диаграммы позднеледникового и голоцена средней Карелии // Палинология в России (к IX Междунар. палинолог. конгр.) (Хьюстон, Техас, 1995). М.: МГУ, 1995. С. 86–103.

Фурсаев А. Д. Естественные леса в пределах трассы государственной лесной полосы Саратов–Камышин // Ученые записки Саратовского гос. университета. 1952. Т. 29. С. 129–182.

Халиков А. Х. Древняя история Среднего Поволжья. М.: Наука, 1969. 395 с.

Хмелев К. Ф. История развития растительного покрова Центрального Черноземья в голоцене // Биол. науки. 1979. № 1. С. 57–66.

Хржановский В. Г., Соколова-Доманская Н. П. К изучению патогенеза деструктивных побегов у яблони // Изв. Тимирязевской с/х академии. 1962. № 1(44). С. 45–62.

Цепляев В. П. Леса СССР. М.: Сельхозгиз, 1961. 452 с.

Чепурная А. А., Новенко Е. Ю. База данных споропыльцевых спектров территории России и сопредельных стран как инструмент палеоэкологических исследований // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 1. С. 119–128.

Чигуряева А. А., Воронина К. В. К истории развития растительности болота Моховое в Саратовской области // Почвы и растительность Юго-Востока. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1970. С. 159–163.

Шаландина В. Т. История растительного покрова Северо-Востока Приволжской возвышенности в голоцене // Самарская Лука. 1993. № 4(93). С. 84–91.

References

Blagoveshchenskaya N. V. Dynamics of vegetation cover of the central part of the Volga Upland in the Holocene. Ulyanovsk: UIGU; 2009. 283 p. (In Russ.)

Blagoveshchenskaya N. V. Peculiarities of interpretation of subfossil spore-pollen spectra of the Volga Upland (for the purpose of paleobotanical reconstructions). *Byulleten' MOIP = Bull. of Moscow Society of Naturalists*. 2016;5(121):48–63. (In Russ.)

Blagoveshchenskaya N. V. Forest and steppe relationships in the south of the Volga Upland during the Holocene. *Russian Journal of Ecology*. 2020;51(1):31–37. doi: 10.1134/S1067413620010038

Blagoveshchenskaya N. V. Forest vegetation zones of the central part of the Volga Upland in the Holocene and their correlation with adjacent regions. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki = Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*. 2019;161(1):108–128. (In Russ.). doi: 10.26907/2542-064X.2019.1

Blagoveshchenskaya N. V., Chernyshev A. V. Dynamics of wetland ecosystems of the Volga Upland. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2012;2:124–131. (In Russ.)

Blagoveshchenskii I. V. Marsh birch forests of the central part of the Volga Upland. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 2006;91(3):425–445. (In Russ.)

Blagoveshchenskii I. V. Structure of vegetation cover, systematic, geographical and ecological-biological analysis of flora of marsh ecosystems of the central part of the Volga Upland: DSc (Dr. of Biol.) thesis. Ulyanovsk; 2006. 495 p. (In Russ.)

Blagoveshchenskii I. V., Blagoveshchenskaya N. V., Isaeva T. N. Indigenous forest communities of the western-central part of the Volga Upland. *Vestnik Saratovskogo gosuniversiteta im. N. I. Vavilova = Bulletin of N. I. Vavilov Saratov State University*. 2014;4:9–14. (In Russ.)

Blagoveshchenskaya N. V., Blagoveshchenskii I. V. Dynamics of vegetation cover of floodplain swamps of the Volga Upland in the Holocene. *X Galkinskii chteniya: Materialy konf. (St. Petersburg, 4–6 fevralya 2019 g.) = X Galkin Readings: conference proceedings (St. Petersburg, Feb. 4–6, 2019)*. St. Petersburg; 2019. P. 19–23. (In Russ.)

Blagoveshchenskaya N. V., Blagoveshchenskii I. V. Stratigraphy and evolution of the vegetation cover of watershed swamps of the Volga Upland. *XII Galkinskii chteniya – Tipy bolot Rossii: Materialy konf. (St. Petersburg, 3 fevralya 2023 g.) = XII Galkin Readings - Types of swamps in Russia: conference proceedings (St. Petersburg, Feb. 3, 2023)*. St. Petersburg; 2023. P. 17–20. (In Russ.)

Blagoveshchenskii I. V. Structure of vegetation of marsh ecosystems in the central part of the Volga Upland. Ulyanovsk: UIGU; 2020. 271 p. (In Russ.)

Blagoveshchenskii V. V. Vegetation of the Volga Upland in connection with its history and rational use. Ulyanovsk: UIGU; 2005. 715 p. (In Russ.)

Boldyrev V. A. Structure and productivity of forests in the southern part of the Volga Upland. *Lesovedenie = Forest Science*. 2006;6:27–33. (In Russ.)

Borisova O. K. Changes in vegetation and climate in the central region of the Russian Plain in the Holocene: the problem of hornbeam participation in forest communities. *Prirodnaya sreda i modeli adaptatsii ozernykh poselenii v mezolite i neolite lesnoi zony Vostochnoi Evropy: Mat-ly Mezhdunar. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, 19–21 maya 2014) = Natural environment and adaptation models of lake settlements in the Mesolithic and Neolithic forest zone of Eastern Europe: proceedings of the int. scientific conf. (St. Petersburg, May 19–21, 2014)*. St. Petersburg: IIMK RAN; 2014. P. 37–40. (In Russ.)

Burov G. M. Archaeological monuments of Upper Sviyaga. Ulyanovsk: Privolzhskoe izd-vo; 1972. 56 p. (In Russ.)

Burov G. M. Bronze Age burial mounds near Ulyanovsk. Ulyanovsk: Privolzhskoe izd-vo; 1974. 68 p. (In Russ.)

Chepurayeva A. A., Novenko E. Yu. Database of spore-pollen spectra of the territory of Russia and neighboring countries as a tool for paleoecological research. *Izves-*

tiya RAN. Ser. geogr. = Proceedings of RAS. Geographical Series. 2015;1:119–128. (In Russ.)

Chiguryaeva A. A., Voronina K. V. On the history of vegetation development of the Mokhovoe swamp in the Saratov Region. *Pochvy i rastitel'nost' Yugo-Vostoka = Soils and vegetation of the Southeast*. Saratov: Sarat. un-t; 1970. P. 159–163. (In Russ.)

Dvornikov M. G., Chashchin P. V. Dynamics of ecosystems of the north-east of the Volga basin in the Holocene. *Izvestiya Samarskogo NTs RAN = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010;12(1):21–26. (In Russ.)

Dimitriev A. V., Efeikin D. P., Krasnov N. A. Trends in changes in the dynamics of vegetation cover in the Volga region of the Chuvash Republic. *Samarskaya Luka*. 1993;4(93):91–93. (In Russ.)

Elina G. A. Principles and methods of reconstruction and mapping of the Holocene vegetation. Leningrad: Nauka; 1981. 180 p. (In Russ.)

Filimonova L. V. Standard spore-pollen diagrams of Late Glacial and Holocene in Middle Karelia. *Palinologiya v Rossii (k IX Mezhdunarodn. palinolog. kongr.) (Kh'yuston, Tekhas, 1995) = Palynology in Russia (to the IX International Palinology Congress) (Houston, Texas, 1995)*. Moscow: MGU, 1995. P. 86–103. (In Russ.)

Fursaev A. D. Natural forests within the route of the state forest belt Saratov-Kamyshin. *Uchenye zapiski Saratov. gos. univ. = Proceedings of Saratov State University*. 1952;29:129–182. (In Russ.)

Isaev I. E. Some indicators of the ecological productivity of young forest stands in the Ulyanovsk Region. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N. I. Vavilova = Bulletin of N. I. Vavilov Saratov State Agrarian University*. 2013;9:12–15. (In Russ.)

Isaev I. E. Phytocenotic structure and ecological features of young growths of the Ulyanovsk Region: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Ulyanovsk; 2014. 24 p. (In Russ.)

Khalikov A. Kh. Ancient history of the Middle Volga region. Moscow: Nauka; 1969. 395 p. (In Russ.)

Khmelev K. F. The history of development of the vegetation cover in the Central Chernozem Region in the Holocene. *Biol. nauki = Biol. Science*. 1979;1:57–66. (In Russ.)

Khrzhanovskii V. G., Sokolova-Domanskaya N. P. To the study of the pathogenesis of destructive shoots in apple trees. *Izv. Timiryazevskoi s/kh akademii = Proceedings of Timiryazev Agricultural Academy*. 1962;1(44):45–62. (In Russ.)

Klimanov V. A., Khotinskii N. A., Blagoveshchenskaya N. V. Climate fluctuations over the historical period in the center of the Russian Plain. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Proceedings of RAS. Geographical Series*. 1995;1:89–96. (In Russ.)

Kudryavtsev A. Yu. Dynamics of fresh pine forest ecosystems in the central Volga Upland. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2023;3:49–58. (In Russ.). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-049-058

Kudryavtsev A. Yu. Dynamics of ecosystems of fresh subor (pine woods on sandy soils) in the central part of the Volga Upland. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal = Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2022;3:279–291. (In Russ.). doi: 10.35885/1684-7318-2022-3-279-291

Lapteva E. G. Development of vegetation and climate on the eastern slope of the Urals in the second half of the late Neopleistocene and in the Holocene: Summary of PhD (Cand. of Geog.) thesis. Moscow; 2007. 24 p. (In Russ.)

Leonova N. A. The history of man-made transformation of vegetation on forest-steppe landscapes of western slopes of the Volga Uplands. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Estestvennye nauki = University Proceedings. Volga Region. Natural Sciences*. 2016;4(16):23–37. (In Russ.)

Leonova N. A. Spatiotemporal transformation of vegetation of the upper plateau of the Volga Upland (within the Penza region). *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Studies*. 2014;9(1):81–85. (In Russ.)

Malysheva G. S. Relationships between forest and steppe on the Volga Upland (for discussion). *Phytodiversity of Eastern Europe*. 2018;XII(2):170–188. (In Russ.)

Merpert N. Ya. From the most ancient history of the Middle Volga region. *Trudy Kuibyshevskoi arkheologicheskoi ekspeditsii = Proceedings of the Kuibyshev archaeological expedition*. Vol. 2. Moscow; 1958. P. 45–156. (In Russ.)

Novenko E. Yu. The vegetation and climate of Central and Eastern Europe in the Late Pleistocene and Holocene: Summary of PhD (Dr. of Geog.) thesis. Moscow; 2016. 50 p. (In Russ.)

Nosova M. B. The history of forest vegetation of the Central-Forest State Reserve in the Holocene: according to the data of the spore-pollen analysis: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 2008. 22 p. (In Russ.)

Pakhomova O. M. History of vegetation of the Vyatka-Kama Cis-Urals in the Late Pleistocene and Holocene: based on the materials of the spore-pollen

analysis: Summary of PhD (Cand. of Geog.) thesis. Moscow; 2004. 22 p. (In Russ.)

Pletneva-Sokolova A. D. Sursko-Volga forests of Chuvashia for a quarter of a century (1928–1953). *Trudy Chuvashskogo sel'skokhozyaistvennogo instituta = Proceedings of Chuvash Agricultural Institute*. 1959;4:9–44. (In Russ.)

Safronova I. N., Yurkovskaya T. K., Miklyaeva I. M., Ogureeva G. N. Zones and types of vegetation zonation in Russia and adjacent territories: Map M 1:8 000 000. Moscow; 1999. 64 p. (In Russ.)

Semenova Tyan-Shanskaya A. M. Materials for the distribution of pine forests in the Volga region. *Trudy Bot. in-ta AN SSSR. Ser. 3. Geobotanika = Proceedings of the Botanical Institute of the USSR Academy of Sciences. Geobotany Series*. 1957;11:309–338. (In Russ.)

Senator S. A. Vegetation cover of the Middle Volga region in the Holocene. *Samar'skaya Luka: Problemy regional'noi i global'noi ekologii = Samara Luka: Problems of Regional and Global Ecology*. 2017;26(2):73–81. (In Russ.)

Shalandina V. T. History of the vegetation cover of the North-East Volga Upland in the Holocene. *Samar'skaya Luka*. 1993;4(93):84–91. (In Russ.)

Smirnova O. V., Toropova N. A. Main features of the population biology of plants (edificators and assectators) of the modern forest belt. *Vostochnoevropeiskie lesa: istoriya v golotsene i sovremennost' = Eastern European forests: history in the Holocene and modern times*. Moscow: Nauka; 2004. P. 154–165. (In Russ.)

Spygin I. I. Vegetation cover of the Middle Volga region. Samara-Moscow; 1931. 66 p. (In Russ.)

Tseplyaev V. P. Forests of the USSR. Moscow: Sel'khozgiz; 1961. 452 p. (In Russ.)

Tyuremnov S. N. Peat deposits. Moscow: Nedra; 1976. 487 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 11.06.2025; принята к публикации / accepted: 24.07.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Благовещенская Нина Васильевна

д-р биол. наук, доцент, профессор кафедры общей и биологической химии

e-mail: blago173@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Blagoveshchenskaya, Nina

Dr. Sci. (Biol.), Associate Professor, Professor of General and Biological Chemistry Dept.

УДК 528.854.4

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДЕШИФРИРОВАНИЯ КРУПНЫХ БОЛОТНЫХ КОМПЛЕКСОВ КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

О. В. Артемьева* , Н. А. Позднякова, И. А. Флоринский

*Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле
(Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034), *o.artemieva@spbu.ru*

Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) открывают широкие возможности для исследований в различных областях, позволяя оперативно изучать обширные территории. Применение данных ДЗЗ активно внедряется в систему управления территориями и способствует сохранению целостности природных комплексов. Особую сложность для анализа представляют болотные ландшафты, характеризующиеся высокой пространственной неоднородностью, динамичностью во времени и сходством спектральных характеристик с другими типами растительности. В статье рассматриваются возможности использования данных ДЗЗ для определения контуров болотных массивов методами автоматизированного дешифрирования. В статье представлены разработка и описание оптимального алгоритма автоматизированного распознавания крупных болотных систем, обеспечивающего надежное выявление границ этих природных объектов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания эффективных алгоритмов оперативной дифференциации болотных комплексов на значительных территориях, что позволит сократить объемы трудоемких полевых исследований. Важно отметить, что в научной литературе до сих пор отсутствуют универсальные методики дешифрирования обширных болотных территорий. Исследование проводилось в восточной части Всеволожского района Ленинградской области – регионе, характеризующемся активным хозяйственным освоением, включающим не только расширение городской и сельской застройки, но и строительство кольцевых автомобильных и железнодорожных магистралей. Выбранная территория представляет особый интерес благодаря разнообразию болотных ландшафтов и уникальным природным особенностям региона, включающего более 40 особо охраняемых природных территорий, развитую транспортную сеть и объекты культурного наследия. Авторами разработан алгоритм выявления границ болотных систем, охватывающих несколько болотных массивов. Теоретическая значимость работы заключается в исследовании возможностей применения методов автоматизированной классификации и данных спутникового дистанционного зондирования для изучения обширных болотных ландшафтов. Практическая ценность исследования состоит в проведении сравнительного анализа методов автоматизированной классификации, что может быть полезно для последующих экологических, биогеографических, болотоведческих исследований и упрощения процесса создания геоботанических карт.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование; Ленинградская область; Карельский перешеек; данные дистанционного зондирования; космические снимки; болота

Для цитирования: Артемьева О. В., Позднякова Н. А., Флоринский И. А. Разработка и исследование алгоритма дешифрирования крупных болотных комплексов Карельского перешейка Ленинградской области // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 44–55. doi: 10.17076/eco1982

O. V. Artemeva*, N. A. Pozdnyakova, I. A. Florinskii. DEVELOPMENT AND STUDY OF AN ALGORITHM FOR DECODING LARGE MIRE MASSIFS OF THE KARELIAN ISTHMUS, LENINGRAD REGION

*Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences (7-9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia), *o.artemieva@spbu.ru*

Remote sensing technologies open up wide opportunities for research in various fields, allowing for a rapid study of vast territories. The use of remote sensing data is being actively introduced into territorial management systems, helping preserve the integrity of natural ecosystems. Mires are particularly challenging to analyze, as they are characterized by high spatial heterogeneity, temporal dynamism, and similarity of spectral characteristics with other types of vegetation. This article examines the potential of using automated interpretation of remote sensing data to delineate wetland areas. We undertook to develop and describe an optimal algorithm for automated recognition of large mire landscapes and reliable delineation of these natural features. The relevance of this study stems from the need to develop effective algorithms for rapidly differentiating mires out of large areas, and thus save on labor-intensive fieldwork. It is important to note that the scientific literature still lacks universal methods for interpreting large areas of mire landscapes. The study was conducted in the eastern part of the Vsevolozhsk District of the Leningrad Region – an area characterized by active economic development, including not only the expansion of urban and rural communities, but also the construction of ring roads and railways. The selected area is of particular interest due to the diversity of its mire ecosystems and unique natural features, which include more than 40 protected areas, a ramified transportation network, and cultural heritage sites. The authors have developed an algorithm for identifying the boundaries of wetland systems encompassing several mire areas. The theoretical significance of this study lies in exploring the potential of automated classification methods and satellite imagery for studying large areas of mire landscapes. Its practical value consists in conducting a comparative analysis of automated classification methods, which could be useful for subsequent ecological, biogeographical, and wetland studies and for simplifying the process of creating geobotanical maps.

Keywords: automated interpretation; Leningrad Region; Karelian Isthmus; remote sensing data; satellite imagery; mires

For citation: Artemeva O. V., Pozdnyakova N. A., Florinskii I. A. Development and study of an algorithm for decoding large mire massifs of the Karelian Isthmus, Leningrad Region. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 44–55. doi: 10.17076/eco1982

Введение

Болота – природные образования, представляющие собой переувлажненные участки земной поверхности со слоем торфа и специфическими формами растительности, приспособившимися к условиям избытка влаги, слабой проточности и недостатку кислорода. Они являются одними из важнейших природных объектов, как для человека, так и для природы в целом. Болотные экосистемы питают подземные водоносные горизонты, выступают важнейшими продуцентами кислорода, производя его иногда больше, чем леса, в то же время поглощая больше углекислого газа, становясь тем самым настоящими

«легкими планеты». Они очищают воду, регулируют режим рек, поглощают большое количество вредных веществ. В них происходит формирование такого полезного ископаемого, как торф, который имеет широкое применение: в энергетике, сельском хозяйстве, химической промышленности, медицине [Ильсов и др., 2019]. Болота являются местообитанием множества ценных и редких видов флоры и фауны. Данные экосистемы влияют на планирование территорий: без знания их расположения и характеристик невозможно рационально воспользоваться землями с минимальным ущербом для природных комплексов, вместе с тем получив максимальную выгоду [Aaviksoo et al., 1997].

Важно различать болота и заболоченные территории. Во-первых, болота имеют специфическую растительность, приспособившуюся к их характерным особенностям: малой проточности, недостатку кислорода, избыточной влаге. Во-вторых, в большинстве случаев они имеют слой торфа, превышающий 30–50 см, чего не наблюдается, например, в заболоченных лесах. Однако существуют пойменные болота, в которых торфонакопление отсутствует в связи с периодическим повышением мощности аллювия и делювия, и, например, болота степной и пустынной зон, где торфообразованию мешает быстрый распад растительных остатков из-за сухого воздуха и высоких температур [Ниценко, 1967].

В научной литературе существуют различные термины, описывающие участки земной поверхности, занятые болотными экосистемами. Единства среди авторов-болотоведов нет. Понятие «болото» употребляется в весьма широком смысле. Его используют, описывая данные экосистемы, к примеру, по типу питания: «верховое болото», «переходное болото». Однако болотом также называют и каждое отдельное угодье как участок земли, являющийся объектом хозяйственного использования или пригодный для этой цели. Также часто используется аналогичный по своей сути термин «болотный массив»: участок поверхности, занятый болотом, границы которого представляют собой отдельный контур. Авторами были исследованы природные системы, которые следует трактовать как «болото» в классическом смысле термина. При этом рассмотрению подверглись большие по площади образования, зачастую представляющие собой несколько слившихся массивов, то есть можно говорить об исследовании «болотных систем», имеющих сложную, комплексную структуру, или крупных болотных комплексов. Таким образом, в данной работе термин «болотный комплекс» используется в более широком понимании, чем принято в работах в области болотоведения, где он обозначает сочетание двух или более растительных ассоциаций, фитоценозы которых имеют определенную приуроченность к элементам микрорельефа, когда они мозаично чередуются друг с другом, создавая при этом своеобразный пятнистый ландшафт [Ниценко, 1967; Денисенков, 2000]. Учитывая возможный интерес к данной разработке широкого круга пользователей – работников, занятых в сельскохозяйственном производстве, строительстве, которые не имеют специальных знаний в науках о Земле, обработке ДДЗ и в узкоспециализированной терминологии, авторы будут

придерживаться использования и в названии, и в самой работе термина «болотный комплекс» в близком с «болотной системой» значении.

Вся исследуемая территория находится в пределах Восточно-Европейской равнины, в северо-западной ее части находится граница Русской платформы и Балтийского щита. С запада омывается водами Финского залива Балтийского моря, в центре частично заходит на территорию области крупнейшее озеро Европы – Ладожское. Гидрографическая сеть очень густая, здесь располагается большое количество небольших рек и ручьев. Также протекают такие крупные реки, как Нева, Волхов, Свирь, Вуокса, Луга. Климат умеренный континентальный, гумидный. Все эти условия способствуют образованию болотных систем, которые встречаются повсеместно.

Карельский перешеек – территория, расположенная между Финским заливом и Ладожским озером, с юга ограниченная Невой, а с севера – линией, соединяющей бухту Защитную близ Выборга и залив Пеконлахти, самую западную точку Ладожского озера. Включает в себя Всеволожский, Приозерский и основную часть Выборгского района Ленинградской области, Калининский, Приморский, Курортный, Выборгский, Красногвардейский районы с правобережной частью Невского района Санкт-Петербурга и юго-западную часть Республики Карелия в районе поселка Хийтола. На данной территории находится множество болот различного генезиса, исследования которых имеют значительную историю [Абрамова, 1963; Доронина и др., 2020; Смагин, Бойчук, 2021].

Все болота в научной литературе по типу питания подразделяются на следующие категории:

1. Низинные (эвтрофные). Они расположены в понижениях рельефа, характерной растительностью является ольха, береза, осока, тростник и рогоз. Насыщение водой в основном происходит за счет подземных водных источников. Характеризуются питанием водами с высоким содержанием минеральных солей.

2. Переходные (мезотрофные). Они получают питание как из атмосферных осадков, так и из подземных источников. Характерная растительность – береза, сосна, осоки, сфагновые мхи.

3. Верховые (олиготрофные). Эта группа, как правило, расположена на водоразделах, вода обладает резкой кислотностью, питание происходит в основном за счет атмосферных осадков. Характерная растительность – сосна, пушица, кустарнички, сфагновые мхи. Питание водами с низким содержанием минеральных солей [Ниценко, 1967].

На Карельском перешейке преобладают олиготрофные болота (более 60 % площади), мезотрофные занимают до 25 %, а эвтрофные практически не сохранились из-за сельскохозяйственного освоения и торфоразработок [Трасс и др., 1963; Доронина и др., 2020]. В настоящее время наблюдается процесс повторного заболачивания заброшенных участков.

Помимо типа питания на дифференциацию болот также влияют различные геоморфологические особенности местности, окружающей болото, и другие географические факторы. Для большинства болот можно выделить общие характеристики, помогающие в определении данных природных объектов по спутниковым снимкам.

Для дальнейшего рационального использования больших по площади земель необходимо знать все морфологические характеристики территории. В связи с этим возникает вопрос с определением границ крупных болотных массивов, в то время как большинство исследований направлены на дешифрирование структуры лишь в пределах одного болотного контура [Казаков, 2013; Зраенко, 2016; Крутских и др., 2018].

В настоящем исследовании авторы предлагают рассмотреть алгоритм дешифрирования крупных болотных массивов на участке к северо-востоку от Санкт-Петербурга во Всеволожском районе Ленинградской области (рис. 1).

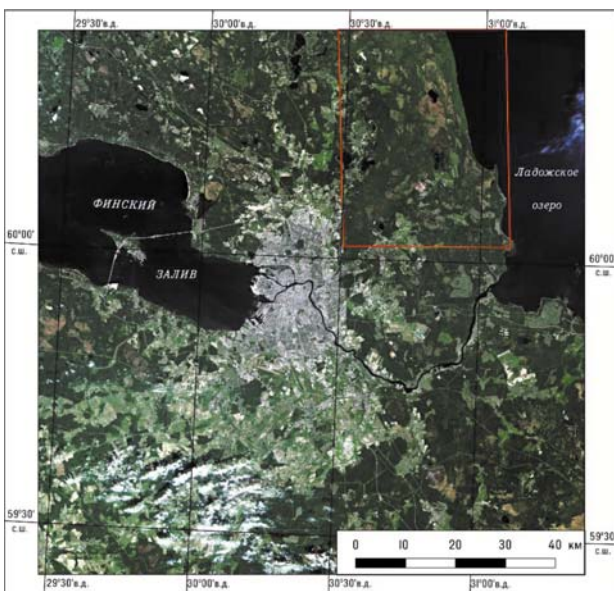


Рис. 1. Исследуемая территория на космическом снимке в естественных цветах [Copernicus...]

Fig. 1. The study area on a satellite image in natural colors [Copernicus...]

Исследуемый участок является весьма характерной территориальной выборкой из всего Карельского перешейка: разнообразие ландшафтов, наличие всех характерных типов болот, присутствие на территории таких значимых болотных систем, как Волеярвское, Лепсарское, Нясинское и Красное болота. Предложенные алгоритмы могут быть использованы для всей территории перешейка, а также южных и центральных частей Республики Карелия. Исследование проводилось различными алгоритмами автоматизированного дешифрирования с использованием инструментов соответствующих модулей в программных продуктах QGIS и ArcGIS Pro.

Материалы и методы

Предлагаемые алгоритмы проведения дешифрирования болот по спутниковым снимкам включают в себя следующие этапы обработки ДДЗ: предварительная обработка, проведение классификации и оценка точности.

Предварительная обработка. На первом этапе проведен сбор и подготовка исходных данных. В работе использовались космические снимки Sentinel-2, полученные 17 июня 2023 г. при облачности менее 10 %. Пространственное разрешение составило 10 м в диапазонах видимого и ближнего инфракрасного излучения. Для анализа были выбраны четыре канала, которые обеспечивают наибольшую информативность при дифференциации болотных и прилегающих ландшафтов [Медведева и др., 2019]. Характеристики используемых каналов представлены в табл. 1.

Все данные импортированы в программный продукт QGIS. Для работы задействованы модули DZetsaka и Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Плагин SCP, являясь инструментом с открытым исходным кодом, предоставляет возможности для контролируемой классификации и кластеризации изображений, а также их предварительной и постобработки [Github...]. Он поддерживает работу с данными спутниковых систем Sentinel, ASTER, Landsat и MODIS.

Поскольку использовались снимки уровня L2A, радиометрическая коррекция и атмосферная коррекция были уже выполнены поставщиком данных. Для повышения достоверности классификации снимок был обрезан по векторному слою-маске.

Район исследования расположен к северо-востоку от Санкт-Петербурга и к северу от Всеволожска. Его северная граница определена краем снимка вблизи границы Всеволожского и Приозерского районов, восточная – акваторией

Таблица 1. Основные характеристики используемых каналов спутниковой системы Sentinel-2

Table 1. The main characteristics of the channels used in the Sentinel-2 satellite system

Каналы Sentinel-2 Sentinel-2 channels	Средняя длина волны, мкм Average wavelength, μm	Пространственное разрешение, м Spatial resolution, m
2 – Голубой (BLUE)	0,490	10
3 – Зеленый (GREEN)	0,560	10
4 – Красный (RED)	0,665	10
8 – Ближний инфракрасный (NIR (Near InfraRed))	0,842	10

Ладожского озера. Участок характеризуется высокой концентрацией разнообразных болотных массивов при относительно низкой антропогенной нагрузке, что делает его репрезентативным для задач дешифрирования.

Для эффективной классификации и визуализации результатов критически важен выбор оптимальной комбинации спектральных каналов [Schowengerdt, 2007]. С помощью инструмента «Определить объекты» в QGIS проанализированы спектральные характеристики пяти основных природных классов: вода, лес, сельскохозяйственные угодья, болота и открытые поверхности (почва, грунт). Для каждого класса отобрано по 15 эталонных участков в разных частях снимка. Установлено, что болота наиболее контрастно отделяются от других объектов в синем (BLUE) и зеленом (GREEN) диапазонах. Результаты измерений представлены в табл. 2.

На основе анализа для классификации выбрана комбинация каналов 2-3-8 (GREEN-BLUE-NIR) (рис. 2), которая показала наибольшую информативность для дифференциации болот. Дополнительно создано изображение, включающее все четыре канала (8-3-4-2) [Дюкарев и др., 2008], что позволяет учесть комплексность болот как природных объектов. Болота, будучи переувлажненными территориями, характеризуются специфическим отражением в инфракрасном диапазоне: наличие

воды снижает отражение, а растительный покров, в свою очередь, повышает его, позволяя отделить болота от водных объектов.

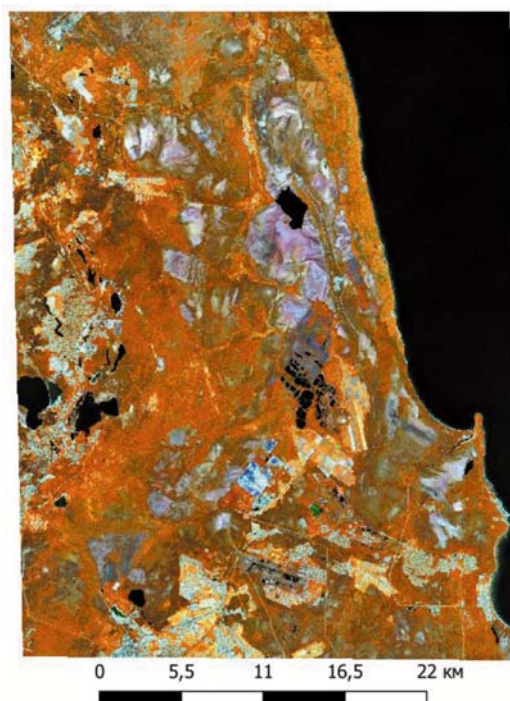


Рис. 2. Комбинация GREEN-BLUE-NIR
Fig. 2. Combination GREEN-BLUE-NIR

Таблица 2. Значения яркости объектов некоторых классов в различных спектральных диапазонах

Table 2. Brightness values of objects of some classes in different spectral range

Спектральный диапазон Spectral range	BLUE	GREEN	RED	NIR
Вода Water	1294,23	1319,38	1224,77	1178,38
Лес Forest	1287,85	1441,08	1273,46	3569,69
Болото Wog	1486,82	1751,85	1898,31	4311,54
Сельскохозяйственные угодья Agricultural land	1588,00	1870,38	1846,23	4358,15
Торф Peat	1361,15	1472,23	1589,31	2556,31

Для анализа растительности применен нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), рассчитываемый по формуле (1) и отражающий количество фотосинтетически активной биомассы [Новохатин, Казаков, 2012]:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}. \quad (1)$$

Значения индекса варьируют от -1 до 1 . Расчет основан на двух наиболее стабильных участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра ($0,6-0,7$ мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной ($0,7-1$ мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Другими словами, высокая фотосинтетическая активность ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей позволяет четко определять и анализировать растительные объекты. Использование именно нормализованной разности, а не простого отношения, увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние облачности, дымки, поглощения атмосферой радиации и прочих [Лабутина, Балдина, 2013].

Для оценки влажности почв использован нормализованный дифференциальный водный индекс (NDWI), вычисляемый по формуле (2):

$$NDWI = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR}. \quad (2)$$

Значения индекса варьируют от -1 до 1 . Данный индекс широко применяется в сельскохозяйственном мониторинге и исследованиях лесных экосистем [Иннотер...].

Проведение классификации. Классификация выполнялась двумя методами: с обучением (контролируемая) и без обучения (неконтролируемая).

Для лучшего понимания того, какие классы целесообразно выделить при классификации, применена неконтролируемая кластеризация с помощью плагина SCP, поддерживающего алгоритмы K-Means и Iso Data. Суть подхода заключается в автоматическом разделении пикселей на группы (кластеры), количество которых, спектральные свойства и наименования заранее неизвестны. Пиксели объединяются в те или иные кластеры на основании схожести спектральных характеристик.

Для обоих методов кластеризации можно задать количество создаваемых кластеров, итераций и способы вычисления расстояния между пикселями: Minimum Distance или Spectral Angle Mapping. Количество итераций задавалось 1000

и не изменялось, в то время как число классов было выставлено 6, 8, 10 и 12. Таким образом, получено 16 классифицированных изображений, при этом использовалось только четырехканальное изображение. Сравнивая их визуально, можно прийти к выводу, что алгоритм минимальных расстояний (Minimum Distance) не подходит для данной цели, так как результаты классификаций не соответствуют выделяемым природным объектам, а в некоторых случаях создано меньшее количество классов, чем необходимо. Метод Iso Data во всех случаях дал классификацию низкого качества. Наиболее точные результаты получили при классификации методом K-Means, используя способ вычисления расстояний между пикселями Spectral Angle Mapping по 10 классам. Определив оптимальный путь получения кластеров, приняли решение провести контролируемую классификацию, создав изображение из 10 классов: водных объектов, лесных массивов, сельскохозяйственных угодий, населенных пунктов, карьеров и открытых поверхностей торфа, сфагновых сосняков, сфагновых болот, обводненных участков болот и осоково-травяных болот.

Контролируемая классификация проводилась на основе заранее размеченных данных (обучающих выборок), собранных с эталонных участков для каждого класса объектов [Зраенко, 2016]. В нашем случае для повышения точности было принято решение о создании 15–20 полигонов для каждого класса. Для этого создали векторный полигональный слой (рис. 3).



Рис. 3. Участок с обучающими выборками
Fig. 3. A plot with training samples

Класс сфагновых болот был разбит на несколько подклассов, так как состоял из объектов с различными показателями яркости, а затем всем подклассам был присвоен единый цвет. Классификация реализована при помощи модуля Dzetsaka, в котором автоматически предустановлен метод модели гауссовой смеси. Особенностью обработки данного модуля является получение итогового результата в виде растрового изображения, которое в дальнейшем можно экспортировать в различные программы. Для проведения контролируемой классификации были выбраны все четыре созданных ранее изображения: комбинации 2-3-8, 8-3-4-2, NDVI и NDWI.

Оценка точности. Точность получившихся классификаций можно оценивать разными способами. Первоначально это можно сделать визуальным способом, сравнивая классифицированные изображения с результатами экспертного дешифрирования. Более формализованный подход – использование матриц ошибок (или матриц несоответствий). Данный метод заключается в том, что выбор контрольных точек в пределах классифицированного участка отбирается автоматически. Точки, как правило, равномерно распределены и каждой присваивается класс, соответствующий значению пикселя в классифицированном изображении, на который она попадает. Затем фактический класс контрольных точек сравнивается с классом, присвоенным алгоритмом, и это сравнение формирует матрицу, на основе которой рассчитываются различные показатели точности. Таким образом, матрица ошибок позволяет объективно оценить, насколько

корректно алгоритм классифицировал каждый из классов, выявляя ошибки смешения одного класса с другим.

В исследовании оценку проводили как визуально (сравнивались результаты автоматизированного и полевого дешифрирования с дополнительным использованием тематических карт Всеволожского района Ленинградской области), так и с использованием матриц несоответствий, опираясь на данные торфяного фонда. Оценка точности матрицами несоответствий проводилась в программном продукте ArcGIS Pro. Для этого был создан векторный слой с точками, содержащими информацию о принадлежности их к каким-либо классам (в нашем случае 368 точек). Несоответствия получались за счет того, что автоматически в таблице атрибутов точек было задано значение класса, определенного от пикселя под точкой, а в соседнем столбце присваивалось значение согласно визуальному определению, к какому классу следует отнести данный пунсон. В результате были получены матрицы ошибок, на основании которых и производился поиск наиболее выгодного для проведения автоматизированного дешифрирования болот и заболоченных территорий изображения (рис. 4).

В августе 2023 г. проведены полевые исследования на территории Всеволожского района, в ходе которых идентифицированы и соотнесены со снимками ключевые типы болотных ландшафтов: сфагновые, осоково-травяные, обводненные болота, а также участки с открытым торфом и сфагновые сосняки. Эти данные использованы как эталонные для верификации результатов классификации.

ClassValue,C	C_1,N,19,11	C_2,N,19,11	C_3,N,19,11	C_4,N,19,11	C_5,N,19,11	C_6,N,19,11	C_7,N,19,11
C_1	55,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_2	0,0000000000	101,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	1,0000000000
C_3	4,0000000000	0,0000000000	6,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_4	0,0000000000	2,0000000000	0,0000000000	4,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_5	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	1,0000000000	7,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_6	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	3,0000000000	0,0000000000
C_7	0,0000000000	2,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	12,0000000000
C_8	0,0000000000	6,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_9	0,0000000000	3,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_10	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_11	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_12	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	2,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_13	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_14	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_15	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	1,0000000000	2,0000000000
C_16	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_17	0,0000000000	9,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_18	6,0000000000	4,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
Total	65,0000000000	127,0000000000	6,0000000000	7,0000000000	7,0000000000	4,0000000000	15,0000000000
P_Accuracy	0,84615384615	0,79527559055	1,00000000000	0,57142857143	1,00000000000	0,75000000000	0,80000000000
Kappa	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000

Рис. 4. Фрагмент матрицы несоответствий для классификации по комбинации 8-3-4-2

Fig. 4. A fragment of the discrepancy matrix for classification by combination 8-3-4-2

Результаты и обсуждение

В ходе исследования разработан алгоритм дешифрирования болотных комплексов и заболоченных территорий по спутниковым снимкам (рис. 5). Алгоритм апробирован на данных миссии Sentinel-2, однако он может быть адаптирован и для использования с другими материалами, обладающими сопоставимыми характеристиками. Этапы обработки в различных программных средах являются схожими.

Наименьшую точность показала классификация на основе нормализованного разностного водного индекса (NDWI). Достоверность определения болот и заболоченных территорий по матрице несоответствий составила 47,5 %. Наблюдались ошибки, такие как ложное определение сфагновых болот в пределах населенных пунктов, отсутствие четкой дифференциации между сфагновыми сосняками и сфагновыми болотами, а также ошибочное отнесение обводненных участков болот к лесным массивам (рис. 6, а).

Классификация по нормализованному разностному вегетационному индексу (NDVI) показала несколько лучший результат с достоверностью 51,8 %. Однако для нее также характерны ошибки: частичное ложное определение сфагновых болот в населенных пунктах, наличие шумового эффекта в зонах сфагновых сосняков (влияние класса сельскохозяйственных угодий) и ошибочная дифференциация сфагновых болот и сосняков в лесных массивах (рис. 6, б).

Классификация по спектральной комбинации каналов 2-3-8 (GREEN-BLUE-NIR) была выполнена с достоверностью 57,6 %. К ее недостаткам можно отнести выраженный шумовой эффект на территориях торфяных разработок (влияние класса населенных пунктов) и частичное ошибочное определение сфагновых болот в селитебных зонах. В то же время контуры болотных массивов в целом соответствуют результатам визуального дешифрирования (рис. 7, а).

Наиболее точные результаты получены при использовании четырехканального изображения (комбинация 8-3-4-2). Достоверность определения болот и заболоченных территорий в этом случае достигла 68,8 % (рис. 7, б). Данный метод позволил хорошо дифференцировать сфагновые сосняки и сфагновые болота. Недостатки включают незначительный шумовой эффект в населенных пунктах и ложное определение части осоково-травяных болот и торфоразработок как сельскохозяйственных угодий.

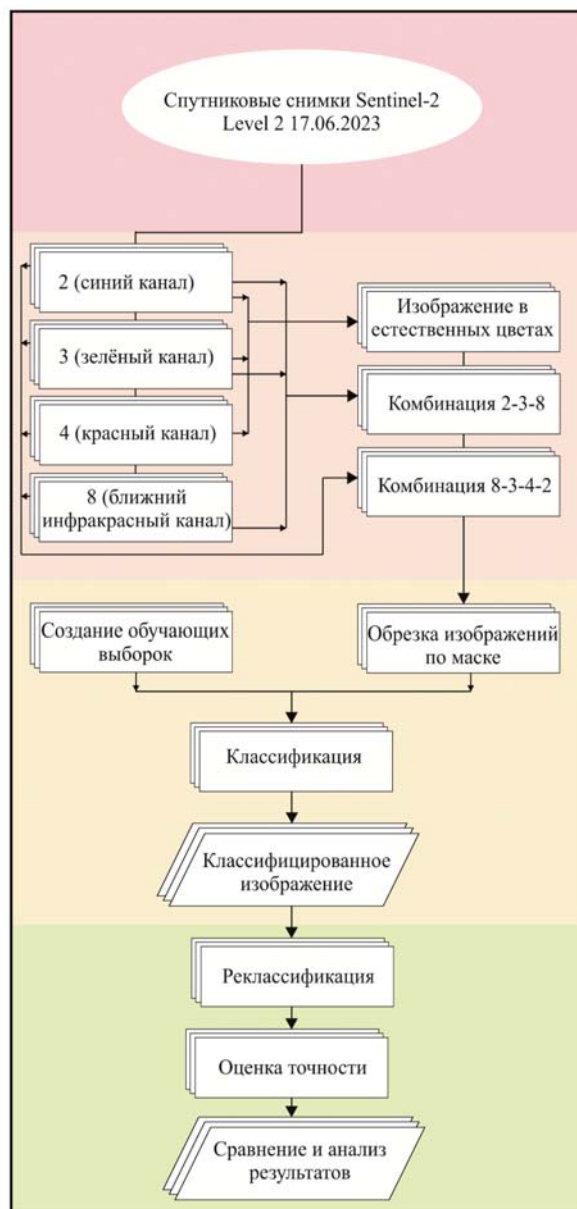


Рис. 5. Блок-схема проведения дешифрирования
Fig. 5. Block diagram of the decryption algorithm

Таким образом, для сравнения итогов классификаций была использована оценка точности при помощи матрицы несоответствий. Среди выбранных изображений достовернее всего прошла классификация по комбинации, содержащей все четыре использованных канала. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что именно она обеспечивает наибольшее количество данных, на основании которых и проводится классификация. Другими словами, болота имеют особенное, по сравнению с другими ландшафтами, отражение в различных диапазонах. К примеру, вода, содержащаяся в болотах, поглощает большее количество

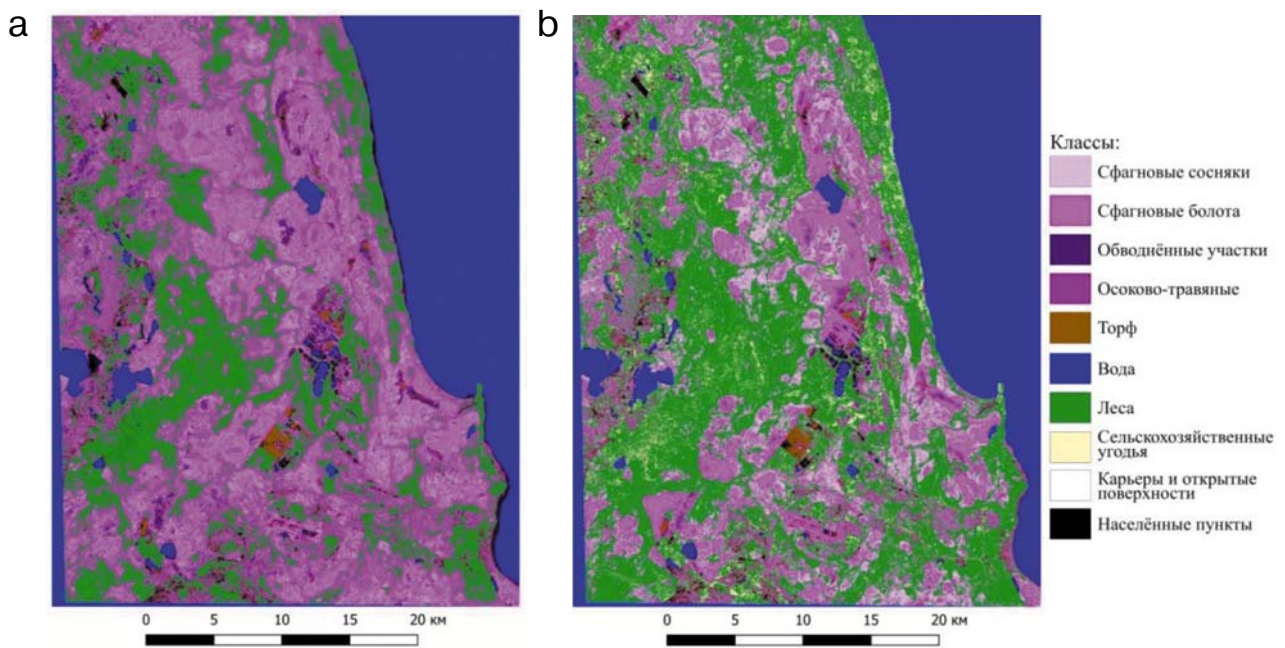


Рис. 6. Результаты классификации (а – по NDWI, б – по NDVI)

Fig. 6. Classification results (a – NDWI, b – NDVI)

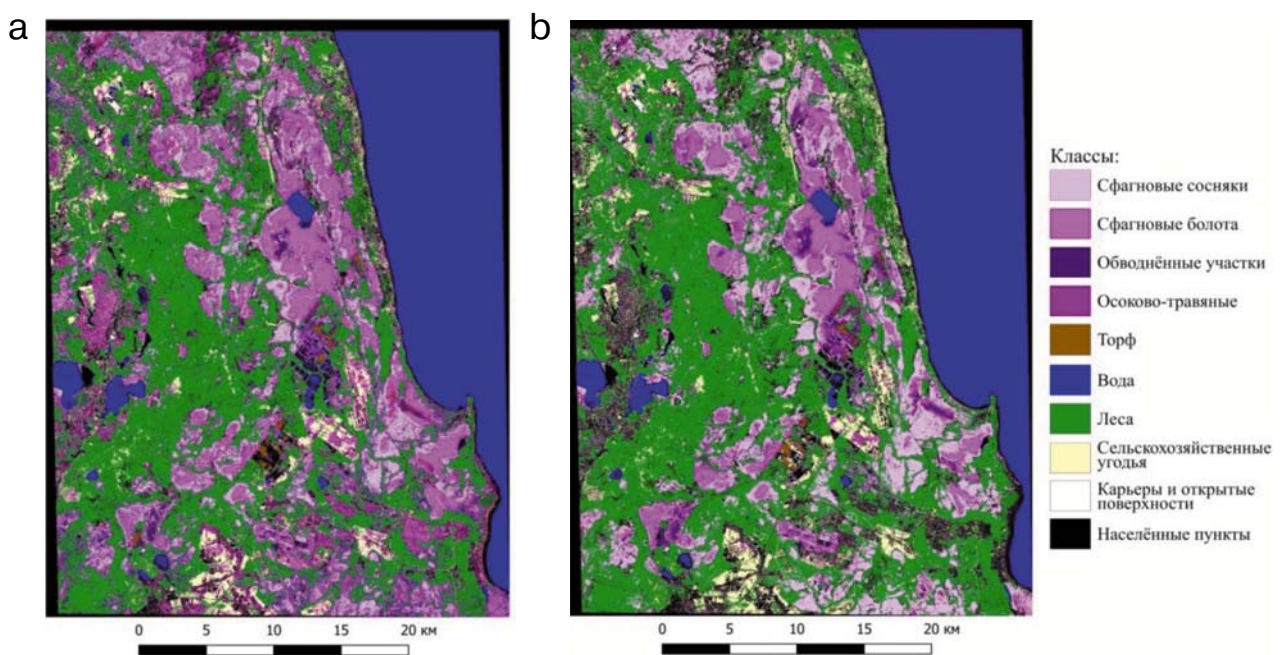


Рис. 7. Результаты классификации (а – по комбинации 2-3-8, б – по комбинации 8-3-4-2)

Fig. 7. Classification results (a – for combination 2-3-8, b – for combination 8-3-4-2)

электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне, чем другие объекты, но в то же время растительный покров, находящийся на болоте, часть этого излучения отражает, однако в меньшем количестве, чем лесные массивы или сельскохозяйственные угодья.

На основе проведенной работы можно выделить следующие ключевые аспекты, которые необходимо учитывать при дешифрировании болот по данным ДЗЗ:

1) Качество исходных данных. Снимки должны иметь минимальную облачность, так как облака

вносят значительные искажения и затрудняют интерпретацию.

2) Качество обучающих выборок. При контролируемой классификации больших территорий корректность создания эталонных полигонов напрямую влияет на результат. Некачественные выборки существенно снижают точность.

3) Вычислительные ресурсы. Для обработки больших массивов данных необходимо обеспечивать достаточный объем оперативной памяти или использовать технологии распределенной обработки.

4) Комплексный подход. Для повышения достоверности следует задействовать максимально широкий набор дешифровочных признаков и спектральных характеристик.

Полевое дешифрирование подтвердило важность создания эталонной коллекции изображений болот с детальным описанием их дешифровочных признаков: формы, размера, цвета, текстуры, структуры и пространственного рисунка. Такая коллекция является основой для корректного выбора эталонных участков и последующей автоматизированной классификации.

Выводы

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Существует практическая необходимость в совершенствовании алгоритмов дешифрирования болот и заболоченных территорий методами дистанционного зондирования Земли. Это позволит ускорить и повысить эффективность принятия решений в различных отраслях народного хозяйства и научных исследованиях. Актуальность данной работы обусловлена наличием на территории Российской Федерации обширных площадей, занятых болотными экосистемами.

2. Ключевой задачей является определение оптимального набора спектральных каналов и диапазонов значений яркости для идентификации различных типов ландшафтов, в частности болот и заболоченных земель. Настоящее исследование вносит вклад в решение этой задачи.

3. Достоверность и точность определения границ объектов классификации в значительной степени зависят от выбора алгоритма классификации.

4. Качество обучающих выборок является критически важным фактором, напрямую влияющим на точность и надежность результатов. Формирование репрезентативных обучающих выборок – один из важнейших этапов автоматизированного дешифрирования крупных болотных массивов.

5. Использование многоканальных мультиспектральных изображений (более трех каналов) повышает точность классификации. В данном исследовании применение четырехканального композита позволило достичь достоверности дешифрирования болот и заболоченных территорий на уровне 68,8 %.

Разработанный в ходе работы алгоритм демонстрирует оптимальный подход к дешифрированию крупных болотных комплексов. Он может быть использован в качестве методической основы для проведения аналогичных исследований не только на территории Ленинградской области, но и в других регионах со схожей структурой земного покрова. Возможность практического применения алгоритма подтверждена данными полевой апробации.

Авторы считают, что научные разработки, направленные на оптимизацию использования земельных ресурсов России, имеют большое значение для будущего развития страны. Проведение фундаментальных и прикладных исследований в этой области является необходимым условием для устойчивого развития государства.

Литература

Абрамова Т. Г. Типология и районирование болот Карельского перешейка // Ученые записки Тартуского университета. 1963. Вып. 145. Труды по ботанике. VII. С. 181–204.

Денисенков В. П. Основы болотоведения. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2000. 224 с.

Дороница А. Ю., Галанина О. В., Смагин В. А., Орлов Т. В. Болота Лемболовской возвышенности (Ленинградская область) // Ботанический журнал. 2020. Т. 105, № 9. С. 909–918. doi: 10.31857/S0006813620090033

Дюкарев Е. А., Головацкая Е. А., Пологова Н. Н. Технологии дистанционного зондирования для установления структуры лесоболотных комплексов ключевого участка «Бакчарский» // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2008. № 4. С. 334–345.

Зраенко С. М. Исследование алгоритмов обнаружения болот по данным дистанционного зондирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО 2016): Мат-лы 26-й Международной Крымской конференции (Севастополь, 4–10 сентября 2016 года). Т. 11. Севастополь, 2016. С. 2419–2424.

Ильясов Д. В., Сирин А. А., Макарова Л. Ю., Букин А. В., Кораблина Н. Е. ГИС-картографирование торфяных болот и антропогенно-измененных торфяников Рязанской области // Вестник РГТУ. 2019. № 1. С. 30–38.

Иннотер [Электронный ресурс]. URL: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksov-i-ikh-primeneniye/> (дата обращения: 13.04.2023).

Казаков А. А. Дистанционное геотермическое картографирование болот Западной Сибири (на примере Тарманского болотного массива) // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 4. С. 161–167.

Крутских Н. В., Миронов В. Л., Рязанцев П. А. Использование ГИС-технологий для обеспечения работ по изучению болотных массивов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24(1). С. 405–418. doi: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-405-418

Лабутина И. А., Балдина Е. А. Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков»: учебное пособие. Географический факультет. М.: МГУ, 2013. 168 с.

Медведева М. А., Возбранная А. Е., Сирин А. А., Маслов А. А. Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 2. С. 150–159. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159

Ниценко А. А. Краткий курс болотоведения. М.: Высшая школа, 1967. 147 с.

Новохатин В. В., Казаков А. А. Использование данных дистанционного зондирования Земли в оценке процесса вторичного заболачивания осушенных болот Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 7. С. 167–173.

Смагин В. А., Бойчук М. А. Болота северо-запада Карельского перешейка (Ленинградская обл.) // Растительность болот: Современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны: Мат-лы IV Междунар. науч. семинара. Минск, 2021. С. 98–101.

Трасс Х., Аллес П., Павел Ю., Перк А. Доклады совещания по геоботаническому исследованию болот северо-запада СССР. Тарту: Тартуск. гос. ун-т, 1963. 352 с.

Aaviksoo K., Kadarik H., Masing V. Kaug-ja lähivõtteid 30 Esti soost. Esimene raamat telmatograafiafiast. Tallinn, 1997.

Copernicus [Электронный ресурс]. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (дата обращения: 09.03.2024).

Github [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/semiautomaticgit/SemiAutomaticClassificationPlugin> (дата обращения: 09.03.2024).

Schowengerdt R. A. Remote sensing: models and methods for image processing. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier; Burlington: Academic Press, 2007. 515 p.

References

Abramova T. G. Typology and zoning of mires of the Karelian Isthmus. *Uchenye zapiski Tartuskogo universiteta = Proceedings of the University of Tartu. Works on Botany. VII.* 1963;145:181–204. (In Russ.)

Aaviksoo K., Kadarik H., Masing V. Aerial views and close-up pictures of 30 Estonian mires. The first book on telmatography, Tallinn; 1997. (In Eston.)

Copernicus. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (accessed: 09.03.2024).

Denisenkov V. P. Fundamentals of swamp science. St. Petersburg: SPb un-t; 2000. 224 p. (In Russ.)

Doronina A. Yu., Galanina O. V., Smagin V. A., Orlov T. V. Bogs of the Lembolovskaya Upland (Leningrad Region). *Botanicheskii zhurnal = Botanic Journal.* 2020;105(9):909–918. (In Russ.). doi: 10.31857/S0006813620090033

Dyukarev E. A., Golovatskaya E. A., Pologova N. N. Remote sensing technologies for establishing the structure of forest-swamp complexes of the key Bakcharsky site. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology.* 2008;4:334–345. (In Russ.)

Github. URL: <https://github.com/semiautomaticgit/SemiAutomaticClassificationPlugin> (accessed: 09.03.2024).

Il'yasov D. V., Sirin A. A., Makarova L. Yu., Bukin A. V., Korablina N. E. GIS mapping of natural and human-disturbed peatlands in the Ryazan Region. *Vestnik RGATU = Bulletin of RSAU.* 2019;1:30–38. (In Russ.)

Innoter. (In Russ.). URL: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksov-i-ikh-primeneniye/> (accessed: 13.04.2023).

Kazakov A. A. Remote geothermal mapping of the marshes of Western Siberia (on the example of the Tarmansky swamp massif). *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tyumen State University.* 2013;4:161–167. (In Russ.)

Krutskikh N. V., Mironov V. L., Ryazantsev P. A. The use of GIS technologies to ensure the study of wetlands. *InterCarto. InterGIS.* 2018;24(1):405–418. (In Russ.) doi: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-405-418

Labutina I. A., Baldina E. A. Workshop on the course 'Decoding aerospace images': a textbook. Faculty of Geography. Moscow: MGU; 2013. 168 p. (In Russ.)

Medvedeva M. A., Vozbrannaya A. E., Sirin A. A., Maslov A. A. Potential of different multispectral satellite data for monitoring abandoned fire hazardous peatlands and rewetting effectiveness. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.* 2019;2:150–159. (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159

Nitsenko A. A. A brief course in swamp science. Moscow: Vysshaya shkola; 1967. 147 p. (In Russ.)

Novokhatin V. V., Kazakov A. A. The use of Earth remote sensing data in assessing the process of secondary waterlogging of drained swamps in Western Siberia. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tyumen State University.* 2012; 7:167–173. (In Russ.)

Schowengerdt R. A. Remote sensing: models and methods for image processing. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier; Burlington: Academic Press; 2007. 515 p.

Smagin V. A., Boichuk M. A. Marshes of the north-west Karelian Isthmus (Leningrad Region). *Rastitel'nost' bolot: Sovremennye problemy klassifikatsii, kartografirovaniya, ispol'zovaniya i okhrany: Mat-ly IV Mezhdunar. nauch. seminara = Proceedings of the IV international scientific seminar 'Vegetation of swamps: Modern problems of classification, mapping, use and protection'.* Minsk; 2021. P. 98–101. (In Russ.)

Trass H., Alles P., Pavel Yu., Perk A. Reports of the meeting on the geobotanical study of the marshes of the north-west of the USSR. Tartu; 1963. 352 p. (In Russ.)

Zraenko S. M. The study of wetlands detection algorithms based on remote sensing data. *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii (KRYMIKO 2016)*:

Mat-ly 26-i Mezhdunarodnoi Krymskoi konferentsii (Sevastopol', 4–10 sentyabrya 2016 goda) = Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2016): Proceedings of the 26th international Crimean conf. (Sevastopol, Sept. 4–10, 2016). Vol. 11. Sevastopol'; 2016. P. 2419–2424. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 01.11.2025; принята к публикации / accepted: 07.11.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Артемьева Ольга Владимировна

канд. геогр. наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики

e-mail: o.artemieva@spbu.ru

Позднякова Наталия Александровна

старший преподаватель кафедры картографии и геоинформатики

e-mail: n.pozdnyakova@spbu.ru

Флоринский Игорь Александрович

студент

e-mail: st094452@student.spbu.ru

CONTRIBUTORS:

Artemeva, Olga

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor

Pozdnyakova, Nataliia

Senior Lecturer

Florinskii, Igor

Student

УДК 556.56;574.36

ФИТОМАССА И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ НИЗИННОГО БОЛОТА В ПОДЗОНЕ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ РЕСПУБЛИКИ КОМИ

Т. А. Пристова*, М. Н. Мигловец, Н. Н. Гончарова, С. В. Загирова

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН
(ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, Россия, 167000), *pristova@ib.komisc.ru

Дана оценка запасов органического вещества и углерода в древесных растениях низинного болота средней тайги Республики Коми. Древесные растения представлены 8 видами, в том числе 5 видами кустарников. На облесенной части исследуемого болота выделено четыре растительных сообщества. Оценка надземной фитомассы древесных растений проведена с использованием 25 модельных деревьев, подземной – с помощью метода монолитов. Установлено, что фитомасса древесных растений низинного болота варьирует от 120 до 3871 г/м², при этом основная доля (72–83 %) приходится на надземные органы. Показано, что запас фитомассы древесного яруса зависит от типа сообщества, численности и таксационных показателей деревьев. Ведущая роль в аккумуляции органического вещества принадлежит березам и соснам с диаметром свыше 4 см. Наибольшим запасом органического вещества характеризуются древесные растения березово-осоково-вахтового сообщества, более низким – березово-осоково-вахново-моховые. В сообществах с разреженным древесным ярусом его фитомасса в 9–32 раза ниже, чем на сильно облесенных участках. Выявлено, что древесные растения, в зависимости от типа сообщества и численности, аккумулируют от 56 до 1742 г С/м². Древесные растения наиболее облесенной части низинного болота в среднем накапливают 969 г С/м². На долю березы приходится от 64 до 73 %, сосны – от 12 до 31 % запасов углерода древесных растений болота. В стволовой древесине сосредоточено около половины запаса углерода. Полученные результаты могут быть использованы для оценки общих запасов органического вещества и круговорота углерода в экосистеме низинного болота.

Ключевые слова: низинное болото; древесные растения; запасы органического вещества и углерода

Для цитирования: Пристова Т. А., Мигловец М. Н., Гончарова Н. Н., Загирова С. В. Фитомасса и запасы углерода древесных растений низинного болота в подзоне средней тайги Республики Коми // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 56–66. doi: 10.17076/eco2131

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН, тема «Средообразующая роль и продуктивность лесных и болотных экосистем Европейского Северо-Востока России» (№ 125020501547-8).

**T. A. Pristova*, M. N. Miglovets, N. N. Goncharova, S. V. Zagirova.
BIOMASS AND CARBON STOCKS OF WOODY VEGETATION OF A FEN IN THE
MIDDLE TAIGA SUBZONE OF THE KOMI REPUBLIC**

*Institute of Biology, Komi Science Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences
(28 Kommunisticheskaya St., 167000 Syktyvkar, Russia), *pristova@ib.komisc.ru*

An assessment of organic matter and carbon stocks in the woody vegetation of a eutrophic fen in the middle taiga of the Komi Republic is presented. Woody vegetation is represented by 8 plant species, including 5 shrubs. Four vegetation communities have been identified in the forested sites of the fen. The aboveground biomass of woody plants was estimated from 25 model trees, and the underground biomass was estimated using the soil monolith method. The biomass of woody plants in the fen varied from 120 to 3871 g/m², with the bulk (70–74 %) of organic matter accumulating in the aboveground organs. The tree-layer biomass stock is shown to depend on the type of community, the number and qualities of the trees. Birch and pine trees < 4 cm in diameter contribute the most to organic matter accumulation. Birch-sedge-buckbean communities are characterized by the highest organic matter stock, while birch-sedge-buckbean-moss communities have a lower stock. The tree-layer biomass of sparsely treed communities is 9–32 times lower than in forested areas of the fen. It is estimated that, depending on the type of community and abundance, woody plants accumulate 56 to 1742 g C/m². It was found that the woody plants in the fen area with the densest tree stand accumulate an average of 969 g C/m². Birch accounts for 64 to 73 %, and pine for 12 to 31 % of the carbon stocks of woody vegetation in the fen. Stem wood contains about a half of the carbon stock. These results can be used to estimate the total organic matter stores and the carbon cycle in the ecosystem of a eutrophic fen.

Keywords: fen; woody plants; organic matter and carbon stocks

For citation: Pristova T. A., Miglovets M. N., Goncharova N. N., Zagirova S. V. Biomass and carbon stocks of woody vegetation of a fen in the middle taiga subzone of the Komi Republic. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 56–66. doi: 10.17076/eco2131

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Institute of Biology of the Komi Science Center, Ural Branch RAS, within the research theme “The environment-forming role and productivity of forest and mire ecosystems of North-eastern European Russia” (No. 125020501547-8).

Введение

Болотные экосистемы играют важную роль в депонировании углерода в Северном полушарии, где сосредоточена большая часть болот [Joosten et al., 2016; IPCC..., 2021]. В последние десятилетия изучению запасов углерода в болотных экосистемах уделяется большое внимание в связи с долговременным стоком углерода и его накоплением в органическом веществе торфа. Оценка запасов фитомассы и углерода выполнена для большинства типов болот таежной зоны, при этом основное внимание уделено верховым и переходным массивам [Вагина, Шатохина, 1976; Юрковская, 1995; Kosykh et al., 2008, 2023; Миронычева-Токарева и др., 2009; Косых, Коронатова, 2010; Laine et al., 2012; Углерод..., 2014; Копотева, Купцова, 2016; Мигловец, Гончарова, 2018; Purre et al., 2019; Титлянова, Вишнякова, 2022; Леонова и др., 2023; Kutenkov et al., 2024].

Запасы углерода низинных болот менее изучены, несмотря на то, что они встречаются во всех областях Евразии [Joosten et al., 2017]. Как правило, этот тип болот приурочен к поймам рек, к участкам с близким залеганием богатых минеральными веществами грунтовых вод или к выходу их на поверхность [Юрковская, 1995]. На территории Республики Коми низинные болота встречаются во всех природных зонах и представлены как небольшими по площади массивами (преимущественно это болота напорного питания или ключевые), так и крупными системами [Кадастр..., 2014].

Показатели запаса фитомассы травяно-кустарничкового и мохового покрова, полученные при оценке, выполненной на болотах Западной Сибири [Ефремов и др., 2005; Косых, Махаткова, 2008; Копотева, Косых, 2011], значительно меньше данных по запасам органического вещества растений древесного яруса болотных

сообществ [Пьявченко, 1967; Вомперский, Иванов, 1978; Копотева, Косых, 2011; Головацкая, 2017; Коронатова, Косых, 2022; Грабовик, Канцерова, 2023; Kutenkov et al., 2024]. Однако вклад древесного яруса в накопление органического вещества и углерода в болотных экосистемах может быть не менее значим, чем вклад растений травяно-кустарничкового и мохового покрова. Известно, что в бореальной зоне Евразии на мезотрофных лесных болотах фитомасса растительного покрова достигает 1770 ц/га, в то время как на безлесных болотах разной трофности она может быть значительно ниже – 90 ц/га [Боч, Мазинг, 1979]. На болотах Европейского Севера в древесном ярусе встречаются в основном сосна обыкновенная и береза пушистая, при этом доля их участия в формировании фитомассы варьирует в довольно широких пределах. Деревья на болотах характеризуются вариабельностью возрастной структуры, что связано с естественным развитием биогеоценозов при отсутствии рубок, а также природными и антропогенными нарушениями [Сафин, 2011]. На территории Республики Коми оценка запасов органического вещества и углерода ранее была проведена в растениях травяно-кустарничкового и мохового покрова на олиготрофных и мезо-олиготрофных болотах [Углерод..., 2014; Мигловец, Гончарова, 2018]. Цель настоящего исследования – оценить запасы фитомассы и углерода в древесном ярусе низинного болота средней тайги Республики Коми.

Материалы и методы

Исследования проводили на северо-востоке европейской части России, в пределах Восточно-Европейской равнины. Для данного района характерен континентальный умеренно холодный климат со среднегодовой температурой 1,7 °С и годовой суммой осадков 652 мм (среднее за 1991–2021 гг.) (данные по климату получены с официальных репозиторий: <http://aisori-m.meteo.ru>, <https://rp5.ru>). В растительности региона преобладают еловые и сосновые леса, значительная часть нелесных территорий занята болотными экосистемами.

Объектом исследования является низинное болото напорного питания, расположенное в 3–3,5 км к юго-востоку от пгт. Краснозатонский МО ГО «Сыктывкар» на водоразделе рек Вычегда, Сысола и Лемью (61°40'07" с. ш. 51°02'59" в. д.). Болото представляет собой облесенный низинный массив площадью около 40 га, характеризуется высоким видовым и ценотическим разнообразием. В пределах

массива отмечены участки с выровненным, кочковатым и кочковато-западинным микро-рельефом. В растительном покрове болота преобладают облесенные разнотравно-сфагновые сообщества, основу которых составляют гигрофильные эвтрофные и мезоэвтрофные растения. В этих сообществах древесный ярус образован *Betula pubescens* Ehrh., с примесью *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. (состав древостоя 8Б2С+Е). Кустарники отмечены в небольшом количестве, среди них обычны *Sorbus aucuparia* L., *Frangula alnus* Mill., *Juniperus communis* L., *Salix phylicifolia* L. и *S. caprea* L. В травяно-кустарничковом ярусе большинства фитоценозов преобладают травянистые растения, наиболее значимыми среди них являются *Menyanthes trifoliata* L., *Thelypteris palustris* Schott., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Bistorta major* Delarbre, *Carex appropinquata* Schumach., *C. rostrata* Stokes, *C. lasiocarpa* Ehrh., *C. caespitosa* L., *C. cinerea* L., *C. pauperula* Michx., *Equisetum fluviatile* L., *Comarum palustre* L., *Eriophorum polystachion* Honck., *Rumex acetosa* L. Моховой покров неоднородный, образован смесью сфагновых и гипновых мхов: *Sphagnum angustifolium* (C. E. O. Jensen ex Russow) C. E. O. Jensen, *S. warnstorffii* Russow, *S. teres* (Schimp.) Angstr., *Paludella squarrosa* (Hedw.) Brid., *Plagiomnium ellipticum* (Brid.) T. J. Kop), *Tomentypnum nitens* (Hedw.) Loeske, *Calliergon giganteum* (Schimp.) Kindb., *Climacium dendroides* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr.

Значительную площадь исследуемого болота занимают облесенные осоково-разнотравно-сфагновые, разнотравно-гипновые и тростниково-сфагновые сообщества. В наиболее обводненных частях массива распространены вахтовые, осоково-вахтовые, разнотравно-моховые фитоценозы. По результатам маршрутных исследований вдоль трансекты от края до центра болота в облесенной части выделены четыре растительных сообщества (РС). Березово-осоково-вахтово-моховое сообщество (РС1) находится в открытой и наиболее обводненной слабооблесенной части массива с проточным режимом увлажнения. Березово-вахтово-осоково-сфагновое (РС2), березово-тростниково-разнотравно-сфагновое (РС3) и древесно-осоково-вахтовое (РС4) сообщества в облесенной части болота характеризуются кочковатым и кочковато-западинным микро-рельефом.

Натурные исследования проведены в 2022–2024 гг. Геоботанические описания выполнены согласно общепринятой методике на 16 площадках размером 10×10 и 20×20 м [Методы..., 1991; Ипатов, Мирин, 2008] в пределах каждого РС. Названия растений приведены по:

[Черепанов, 1995; Ignatov et al., 2006]. Перечет древесных растений в растительных сообществах проводили согласно общепринятой в лесной таксации методике и анализировали в соответствии с методическими указаниями [Таксация..., 2014]. Всего в четырех растительных сообществах заложено 20 круговых пробных площадей (размером 300 м²) – по пять в каждом РС. Состав древостоя рассчитан по количеству деревьев диаметром более 4 см.

Для определения надземной массы деревьев и общей (надземной и подземной) массы кустарников применяли метод модельных деревьев [Усольцев, Залесов, 2005]. Отобрано 25 моделей восьми видов, в том числе 11 экземпляров берез, 5 – сосен, 2 – ели, 3 – ивы, 2 – крушины, 1 – можжевельника и 1 – рябины. Их высота – от 0,6 до 10,3 м, диаметр крупных деревьев – от 4 до 20 см. Каждое модельное дерево разделяли на фракции: стволовая древесина, стволовая кора, хвоя (листья), ветви. У кустарников выделяли ствол, ветви, хвою (листья) и корни. Образцы фракции фитомассы каждого модельного дерева и кустарника высушивались при температуре +105 °С до абсолютно сухого состояния. Расчеты абсолютно сухого веса (а. с. в.) надземной части модельных деревьев и общей массы кустарников проведены согласно методикам [Родин и др., 1968; Усольцев, Залесов, 2005]. На основании полученных результатов и перечетных данных рассчитана надземная масса каждого вида древесного растения на единицу площади для всех РС. Отдельно отбирали спилы модельных деревьев и керны для определения возраста.

Массу корней березы, сосны и ели определяли методом монолитов согласно рекомендациям [Родин и др., 1968], которые используются при оценке продуктивности болот и другими

авторами [Kosykh et al., 2008; Головацкая, 2017; Коронатова, Косых, 2022; Титлянова, Вишнякова, 2022]. Отбор монолитов проводился с помощью шаблона площадью 435 см² на глубину до 30–40 см в 10-кратной повторности в каждом растительном сообществе. Монолиты промывались через сито для выделения корней древесных растений [Родин и др., 1968]. Полученные образцы корней распределяли по видам, затем высушивали при температуре +105 °С до абсолютно сухого состояния и взвешивали. Данные по запасам корней рассчитывали в г/м².

Для определения запасов углерода в фитомассе использовали опубликованные данные по концентрации углерода в древесных растениях таежной зоны [Бобкова, Тужилкина, 2001; Пристова, 2022]. Запас углерода рассчитывали умножением массы фракции фитомассы каждого вида древесного растения на концентрацию в ней углерода.

Результаты и обсуждение

Фитомасса древесной растительности.

Фитомасса древесного яруса в исследуемых болотных фитоценозах определяется численностью и морфоструктурой деревьев. Число древесных растений в наиболее облесенных растительных сообществах (РС2, РС3, РС4) в среднем около 3 тыс. экз./га (табл. 1). Количество деревьев диаметром более 4 см в среднем составляет 0,6 тыс. экз./га и варьирует от 0,2 до 1,2 тыс. экз./га. В РС1 встречаются единичные деревья и подрост до 0,7 тыс. экз./га. В этом сообществе количество крупных деревьев небольшое – 0,08 тыс. экз./га. Участие кустарников составляет от 4 до 21 % от общей численности древесных растений исследуемого болота, в тех растительных сообществах, где они есть.

Таблица 1. Численность древесных растений низинного болота, экз./га

Table 1. Number of woody plants in the eutrophic fen, sp./ha

Вид / Species	PC1/VC1	PC2/VC2	PC3/VC3	PC4/VC4
<i>Pinus sylvestris</i>	44	200	316	333
<i>Betula pubescens</i>	649	2572	1765	2548
<i>Picea obovata</i>	33	125	192	183
<i>Frangula alnus</i>	-	42	8	-
<i>Sorbus aucuparia</i>	-	25	-	-
<i>Juniperus communis</i>	-	42	-	-
<i>Salix caprea</i>	-	-	616	-
<i>S. phylicifolia</i>	-	8	-	-
Итого / Total	726	3014	2897	3064

Примечание. Здесь и в табл. 2, 4: PC – растительное сообщество. «-» – вид отсутствует.

Note. Here and in Tables 2, 4: VC – vegetation community. «-» – the species is absent.

Показатели диаметра и высоты у деревьев с диаметром более 4 см различаются в зависимости от древесной породы и растительного сообщества. Средний диаметр деревьев березы в PC2 и PC3 составляет около 8 см, высота 5 м, в PC4 – 10 см и 7 м соответственно. Средний диаметр сосны в PC2 составляет 11 см, высота – 6 м, на PC3 – 9 см и 6 м, в PC4 несколько выше – 12 см и 7 м соответственно. Ель на исследуемом болоте имеет небольшую численность, низкорослая, в угнетенном состоянии, ее средний диаметр 8 см, высота 3 м. Возраст деревьев березы составляет 16–40 лет, сосны – 14–50 лет, ели – 10–32 года, максимальный возраст отдельных деревьев достигает 80 лет.

Фитомасса древесного яруса в растительных сообществах (за исключением PC1) на исследуемом болоте варьирует от 1027 до 3871 г/м², при этом большая часть (70–74 %) накапливается в надземной части – от 759 до 2763 г/м² (табл. 2). Наиболее высоким запасом фитомассы древесных растений характеризуется березово-осоково-вахтовое сообщество (PC4), более низким – березово-вахново-осоково-сфагновое (PC2). В слабооблесенной части болота (PC1) фитомасса древесных растений в 9–32 раза ниже, чем на участках низинного болота с выраженным древесным ярусом.

Полученные результаты близки к значениям фитомассы древесного яруса для мезотрофных болот Карелии (1890–3980 г/м²) [Елина и др., 1984], а также для березово-телиптерисового (1500 г/м²) и сосново-пушицево-сфагнового (3200 г/м²) сообществ эвтрофного болота Тульской области [Леонова и др., 2023]. Широкий диапазон варьирования запасов фитомассы древесного яруса отмечают в олиготрофных и мезотрофных болотах Сибири – 239–2140 г/м² [Косых и др., 2018]. Если сопоставить полученные данные с фитомассой заболоченных лесов, то они, как правило, ниже по сравнению с сосняками и примерно близки к березнякам. Так, фитомасса сосняка кустарничково-сфагнового для европейской части России составляет 3940 г/м² [Вомперский, Иванов, 1978], болотно-травянистого в Карелии – 6780 г/м² [Казимиров и др., 1977], в среднетаежных заболоченных березняках Карелии осоково-сфагнового и тростниково-сфагнового типов – 2300–2630 г/м² [Кучко, Матюшкин, 1971; Медведева и др., 1977].

На исследованном болоте наибольший вклад в надземную фитомассу древесных растений болота вносит береза, наименьший – ель (табл. 2). Низкий запас фитомассы ели обусловлен ее небольшой численностью и угнетенным состоянием деревьев (табл. 1).

Таблица 2. Фитомасса древесных растений низинного болота, г/м² а. с. в.

Table 2. Phytomass of woody plants of the eutrophic fen, g/m² dry matter

Древесная порода, фракция фитомассы Wood species, phytomass fraction	PC1/VC1	PC2/VC2	PC3/VC3	PC4/VC4
Береза, в т. ч. / Birch, including	98,5	676,1	972,3	2922,6
древесина / wood	49,8 ± 6,3	306,1 ± 19,7	443,8 ± 22,9	1219,1 ± 42,0
листья / leaves	8,0 ± 0,9	44,6 ± 2,9	55,6 ± 6,8	177,7 ± 6,1
ветви / branches	10,3 ± 1,4	47,7 ± 3,0	136,1 ± 9,0	372,2 ± 12,8
кора / bark	13,9 ± 1,9	80,9 ± 5,2	126,3 ± 8,2	322,1 ± 11,1
корни / roots	16,5 ± 2,7	196,8 ± 21,9	210,5 ± 24,7	831,5 ± 18,7
Сосна, в т. ч. / Pine, including	13,5	301,9	394,1	885,2
древесина / wood	3,8 ± 0,9	160,6 ± 13,0	190,1 ± 4,3	411,8 ± 40,1
хвоя / needles	3,7 ± 1,0	25,7 ± 2,1	36,9 ± 5,3	65,9 ± 6,4
ветви / branches	2,5 ± 0,7	27,4 ± 22,1	43,0 ± 3,6	70,2 ± 6,8
кора / bark	1,1 ± 0,3	28,6 ± 2,3	34,6 ± 1,5	73,3 ± 7,1
корни / roots	2,4 ± 0,3	59,6 ± 4,8	89,5 ± 7,5	264,0 ± 28,4
Ель, в т. ч. / Spruce, including	7,5	48,1	40,4	63,3
древесина / wood	2,7 ± 0,5	28,5 ± 6,9	15,3 ± 3,2	39,7 ± 9,7
хвоя / needles	1,7 ± 0,3	4,3 ± 1,1	9,4 ± 2,0	6,0 ± 1,5
ветви / branches	0,8 ± 0,1	2,3 ± 0,6	4,9 ± 1,0	3,3 ± 0,8
кора / bark	0,8 ± 0,1	1,5 ± 0,4	4,7 ± 1,0	2,0 ± 0,5
корни / roots	1,5 ± 0,4	11,5 ± 1,8	6,1 ± 0,2	12,3 ± 2,1
Кустарники / Shrubs	-	0,6 ± 0,1	1,2 ± 0,3	-
Всего / Total	119,5	1026,7	1408,0	3871,1

Примечание. Здесь и в табл. 4: «-» – отсутствует компонент фитомассы.

Note. Here and in Table 4: «-» – the phytomass component is absent.

В целом доля участия березы в накоплении надземной фитомассы древесных растений болота варьирует от 46 до 99 %, сосны – от 1 до 50 %, ели – от 1 до 23 %. Вклад древесины березы в накопление ее надземной фитомассы на болоте составляет в среднем 58 %, листьев – 9 %, ветвей – 18 %, коры – 15 %; для сосны эти показатели соответственно 66, 11, 11 и 12 %, для ели – 78, 12, 6 и 4 %. Близкое соотношение компонентов фитомассы приводится для сосны на верховых болотах среднетаежной подзоны Западной Сибири, где на ствол приходится 67 %, хвою – 14 %, ветви – 19 % от общих запасов надземной фитомассы [Коронатова, Косых, 2022].

Вклад кустарников в общий запас органической массы древесных растений исследуемого болота незначителен и не превышает 1,2 г/м² (табл. 2). Распределение запасов фитомассы по компонентам у кустарников различается. У рябины, ивы козьей и крушины 65–76 % надземной фитомассы составляют стволы, 7–10 % – ветви, 11–15 % – листья и 8–10 % – кора. Для можжевельника характерно приблизительно равное количество органического вещества, накапливаемого в стволы и хвое – по 37 %, 15 % в ветвях, 7 % в коре и 4 % в шишках.

Соотношение отдельных фракций в фитомассе деревьев зависит от размеров деревьев. Так, у более крупных берез с диаметром ствола свыше 4 см на древесину приходится больше половины надземной фитомассы, у деревьев с меньшим диаметром ее участие снижается, но при этом возрастает доля листьев. На всех учетных площадках на долю деревьев с диаметром более 4 см приходится от 81 до 98 % надземных запасов органического вещества.

В подземной части древесных растений исследуемого болота (за исключением РС1) на глубине до 30–40 см аккумулируется от 267 до 1108 г/м² органического вещества, или 22–28 % от общей фитомассы древесных растений (табл. 2). Это довольно близко к литературным данным, согласно которым около 30 % фитомассы древесного яруса лесных болот сосредоточены в ее подземной части [Боч, Мазинг, 1979]. В слабооблесенной части болота (РС1) корни древесных растений накапливают значительно меньше органического вещества – 20,4 г/м², что составляет 17 % от общей фитомассы древесных растений данного сообщества. На верховых болотах Западной Сибири доля корней на глубине 0–30 см в общей фитомассе составила 21 % [Коронатова, Косых, 2022]. Довольно близкие показатели по запасам корней приводятся для мезотрофных болот Карелии – от 40 до 1130 г/м² [Елина и др., 1984]

и среднетаежных березняков Карелии болотно-травянистого типа – 1210 г/м² [Казимиров и др., 1977]. Согласно полученным данным, доля сосущих и тонких проводящих корней березы диаметром менее 2 мм в среднем составляет 16 % от подземной фитомассы.

Запасы углерода в фитомассе. Сведения о содержании углерода в болотных растениях в литературе приводятся редко, имеются единичные публикации по концентрации углерода в кустарничках, травах и мхах [Углерод..., 2014]. В данной работе использованы значения концентрации углерода в древесных растениях лиственных и хвойных лесов средней тайги Республики Коми, согласно которым этот показатель варьирует от 45,7 до 50,1 %, в зависимости от вида растения и фракции фитомассы (табл. 3).

На основе данных по фитомассе и концентрации углерода в органическом веществе растений рассчитано, что древесные растения исследуемого болота аккумулируют углерода от 56 до 1742 г С/м², в том числе в надземной фитомассе – от 46 до 1321 г С/м² (табл. 4). Древесная растительность исследуемого болота в более облесенной его части (РС2–РС4) в среднем накапливает 969 г С/м². На болотах Карелии древостой накапливает от 1 г С/м² в малооблесенной аапа части болота до 556 г С/м² в верховых грядово-мочажинных комплексах [Kutenkov et al., 2024]. Согласно данным литературы, в надземной части древесной растительности болот Западной Сибири депонируется от 165 до 532 г С/м² [Коронатова, 2022]. Максимальные значения запасов углерода получены для наиболее облесенной части (РС4), минимальные – в слабооблесенной части болота (РС1) (табл. 4). В общем запасе углерода древесных растений болота на долю березы приходится от 64 до 82 %, в зависимости от растительного сообщества, сосны – от 12 до 31 %, ели – от 2 до 7 %. Значительная часть углерода (72–83 %) накапливается в надземной части древесных растений, в подземной – 17–28 %.

Распределение углерода по фракциям фитомассы древесных растений неравномерно: наибольшее количество углерода депонируется в стволах деревьев (44–54 %), в ветвях – 8–13 %, в ассимилирующих органах – около 7 %, в корнях 22–29 %. Таким образом, на исследуемом болоте 72–83 % углерода древесных растений депонируется в стволах и корнях.

Выводы

1. Фитомасса древесных растений низинного болота подзоны средней тайги Республики Коми варьирует от 120 г/м² на малооблесенных

Таблица 3. Содержание углерода в некоторых видах древесных растений, %
Table 3. Carbon content in some types of woody plants, %

Вид Species	Фракция Fraction	Концентрация углерода Carbon content	Источник данных Data source
<i>Betula pubescens</i>	ствол / trunk	45,7 ± 1,6	Пристова, 2022 Pristova, 2022
	ветви / branches	47,8 ± 1,7	
	листья / leaves	47,2 ± 1,7	
	корни / roots	46,2 ± 1,6	
<i>Picea obovata</i>	ствол / trunk	47,4 ± 1,7	
	ветви / branches	49,7 ± 1,8	
	хвоя / needles	50,1 ± 1,8	
	корни / roots	47,5 ± 1,7	
<i>Sorbus aucuparia</i>	ствол / trunk	45,3 ± 1,2	
	ветви / branches	46,2 ± 1,5	
	листья / leaves	45,5 ± 1,5	
	корни / roots	45,8 ± 1,2	
<i>Salix caprea</i>	ствол / trunk	46,1 ± 1,5	
	ветви / branches	48,9 ± 1,6	
	листья / leaves	47,5 ± 1,5	
	корни / roots	47,9 ± 1,4	
<i>Pinus sylvestris</i>	ствол / trunk	47,9 ± 0,8	Бобкова, Тужилкина, 2001 Bobkova, Tuzhilkina, 2001
	ветви / branches	47,2 ± 1,6	
	хвоя / needles	46,3 ± 1,3	
	корни / roots	49,5 ± 0,8	

Таблица 4. Запасы углерода в фитомассе древесных растений низинного болота, г С/м²
Table 4. Carbon stocks in the tree phytomass of the eutrophic fen, g C/m²

Древесная порода, часть фитомассы Wood species, part of the phytomass	PC1/VC1	PC2/VC2	PC3/VC3	PC4/VC4
Береза, в т. ч. Birch, including	45,5	315,4	454,9	1265,1
надземная / aboveground	37,9	224,5	357,6	980,9
подземная / underground	7,6	90,9	97,3	384,2
Сосна, в т. ч. Pine, including	6,4	152,9	199,6	446,9
надземная / aboveground	5,2	123,4	155,3	316,2
подземная / underground	1,2	29,5	44,3	130,7
Ель, в т. ч. Spruce, including	3,7	22,6	19,2	29,5
надземная / aboveground	3,0	17,1	16,3	23,7
подземная / underground	0,7	5,5	2,9	5,8
Кустарники / Shrubs	-	0,3	0,6	-
Всего / Total	55,6	491,2	674,3	1741,5

участках до 3871 г/м² на участках с хорошо развитым древесным ярусом. Основной вклад в аккумуляцию органического вещества принадлежит деревьям березы и сосны, доля кустарников составляет менее 0,1 % общей фитомассы.

2. Запасы углерода в фитомассе древесных растений низинного болота составляют от 56 до 1742 г С/м². Значительная доля углерода депонируется в надземной части древесных

растений (72–83 %), при этом около половины приходится на стволовую древесину.

3. Показатели запасов фитомассы и углерода древесных растений в разных сообществах различаются в 9–32 раза. Это обусловлено различиями в численности древесных растений, их таксационных показателей и жизненного состояния, что, в свою очередь, связано с неоднородностью гидрологических условий в пределах исследованного болотного массива.

Литература

- Бобкова К. С., Тужилкина В. В.* Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // *Экология*. 2001. № 1. С. 69–74.
- Боч М. С., Мазинг В. В.* Экосистемы болот СССР. Л.: Наука, 1979. 187 с.
- Вагина Т. А., Шатохина Н. Г.* Динамика запасов надземной и подземной органической массы степных, луговых и болотных фитоценозов // *Структура, функционирование и эволюция системы биогеоценозов Барабы*. Т. 2. Биогеоэкологические процессы. Новосибирск: Наука, 1976. С. 217–264.
- Вомперский С. Э., Иванов А. И.* Вертикально-фракционная структура и первичная продукция сосняков болотного ряда // *Лесоведение*. 1978. № 6. С. 13–23.
- Головацкая Е. А.* Биомасса и продукция древесного яруса сосново-кустарничково-сфагновых болот южной тайги Западной Сибири // *Лесоведение*. 2017. № 2. С. 102–110. doi: 10.31857/S0024114822040052
- Грабовик С. И., Канцерова Л. В.* Многолетний мониторинг растительного покрова на осушенных болотах Южной Карелии (на примере мезотрофного травяно-сфагнутого болота) // *Экология*. 2023. № 1. С. 13–21. doi: 10.31857/S0367059723010067
- Елина Г. А., Кузнецов О. Л., Максимов А. И.* Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л.: Наука, 1984. 128 с.
- Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Блойтен В.* Биологическая продуктивность и углеродный пул фитомассы лесных болот Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2005. № 1. С. 29–44.
- Ипатов В. С., Мирин Д. М.* Описание фитоценоза. Методические рекомендации. СПб.: СПбГУ, 2008. 70 с.
- Кадастр* особо охраняемых природных территорий Республики Коми / Под ред. С. В. Дегтевой, В. И. Пономарева. Сыктывкар: Ин-т биологии Коми НЦ УрО РАН, 2014. 428 с.
- Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С.* Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.
- Копотева Т. А., Купцова В. А.* Динамика фитомассы и продукции мезотрофного болота в ходе повторного заболачивания после мелиорации в Приамурье // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2016. Т. 7, № 2. С. 3–12.
- Копотева Т. А., Косых Н. П.* Сравнительная оценка структуры фитомассы и продуктивности мезотрофных кустарничково-сфагновых болот зоны тайги // *Сибирский экологический журнал*. 2011. № 2. С. 301–307.
- Коронатова Н. Г., Косых Н. П.* Продуктивность древесного яруса на верховых болотах в таежной зоне Западной Сибири // *Лесоведение*. 2022. № 4. С. 432–448. doi: 10.31857/S0024114823010035
- Коронатова Н. Г.* Запас углерода древесного яруса верхового болота в Западной Сибири // *Научные основы устойчивого управления лесами: Мат-лы Всерос. конф. с междунар. участием (25–29 апреля 2022 г., Москва)*. М.: ЦЭПЛ, 2022. С. 230–232.
- Косых Н. П., Коронатова Н. Г.* Запасы общей фитомассы и чистая первичная продукция болотных экосистем Сургутского Полесья // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 2010. Т. 1, № 2. С. 41–46.
- Косых Н. П., Коронатова Н. Г., Степанова В. А.* Растительность и продуктивность болотных экосистем заповедника «Юганский» // *Динамика окружающей среды и глобальных изменений климата*. 2018. Т. 9, № 1. С. 53–61. doi: 10.17816/edgcc8950
- Косых Н. П., Махаткова И. Д.* Структура растительного вещества в лесо-болотных экосистемах средней тайги Западной Сибири // *Вестник ТГПУ*. 2008. Вып. 4(78). С. 77–80.
- Кучко А. А., Матюшкин В. А.* Надземная фитомасса березняков южной Карелии и ее изменение с возрастом древостоев // *Лесные растительные ресурсы южной Карелии*. Петрозаводск: Карелия, 1971. С. 41–56.
- Леонова О. А., Бахмат И. В., Солдатова А. В., Волкова Е. М.* Запас органического вещества в надземной части растительных сообществ разных типов болот Тульской области // *XII Галкинские чтения – Типы болот регионов России: Мат-лы конф. (Санкт-Петербург, 3 февраля 2023 г.)*. СПб.: БИН РАН, 2023. С. 76–79.
- Медведева В. М., Егорова Н. В., Антипин В. К.* Биологический круговорот азота и зольных элементов в некоторых типах заболоченных лесов и болот // *Стационарное изучение заболоченных лесов и болот в связи с мелиорацией*. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1977. С. 123–147.
- Методы исследований болотных экосистем таежной зоны* / Отв. ред. О. Л. Кузнецов. Л.: Наука, 1991. 128 с.
- Мигловец М. Н., Гончарова Н. Н.* Биологическая продуктивность аапа болота бассейна р. Печора // *Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Мат-лы XVI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Киров, 3–5 декабря 2018 г.)*. Кн. 1. Киров: ВятГУ, 2018. С. 84–87.
- Мироньчева-Токарева Н. П., Шибарева С. В., Громадка П.* Запасы фитомассы и депонированных в ней элементов питания в травяном болоте Польши // *Сибирский экологический журнал*. 2009. Т. 16, № 2. С. 261–267.
- Пристова Т. А.* Содержание углерода в растениях среднетаежных лиственных фитоценозов Республики Коми // *Принципы экологии*. 2022. № 3. С. 43–49. doi: 10.15393/j1.art.2022.12402
- Пьявченко Н. И.* Биологическая продуктивность и круговорот веществ в болотных лесах Западной Сибири // *Лесоведение*. 1967. № 3. С. 32–43.
- Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилевич Н. И.* Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 145 с.
- Сафин М. Г.* Лесорастительные условия и фитоценозы сфагновых болот Марийского полесья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2011. 22 с.
- Таксация леса: методические указания*. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. 59 с.

Титлянова А. А., Вишнякова Е. К. Изменение продуктивности болотных и травяных экосистем по широтному градиенту // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5, № 2. С. 32–50. doi: 10.31251/pos.v5i2.176

Углерод в лесных и болотных экосистемах ООПТ Республики Коми / Под ред. К. С. Бобковой, С. В. Загировой. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2014. 202 с.

Усольцев В. А., Залесов С. В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. 147 с.

Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.

Юрковская Т. К. Высшие единицы классификации растительности болот // Ботанический журнал. 1995. Т. 80, № 11. С. 28–33.

Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E. A., Abolina A., Akatova T. V., Baisheva E. Z., Bardunov L. V., Baryakina E. A., Belkina O. A., Bezgodov A. G., Boychuk M. A., Cherdantseva V. Ya., Czernyadjeva I. V., Doroshina G. Ya., Dyachenko A. P., Fedosov V. E., Goldberg I. L., Ivanova E. I., Jukoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S. G., Kharzinov Z. Kh., Kurbatova L. E., Maksimov Ya. I., Mamatkulov U. K., Manakyan V. A., Maslovsky O. M., Napreenko M. G., Otnyukova T. N., Partyka L. Ya., Pisarenko O. Yu., Popova N. N., Rykovsky G. F., Tubanova D. Ya., Zheleznova G. V., Zolotov V. I. Check-list of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa*. 2006. Vol. 15. P. 1–130. doi: 10.15298/arctoa.15.01

IPCC: Summary for Policymakers // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T. K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. Cambridge: Cambridge University Press; 2021. P. 3–32. doi: 10.1017/9781009157896.001

Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation // *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice* / Eds. Bonn A., Allott T., Evans M., Joosten H., Stoneman R. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016. P. 63–76.

Joosten H., Tannenberger F., Moen A. Mires and peatlands of Europe. Status, distribution and conservation. Spain, 2017. 780 p. doi: 10.1127/mreseurope/2017/0001-0001

Kosykh N. P., Koronatova N. G., Mironycheva-Tokareva N. P., Vishnyakova E. K., Ivchenko T. G., Kurbatskaya S. S., Peregon A. M. The bogs in a forest – steppe region of Western Siberia: plant biomass and net primary production (NPP) // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 20. P. 3526. doi: 10.3390/w15203526

Kosykh N. P., Koronatova N. G., Naumova N. B., Titlyanova A. A. Above-and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems of Western Siberia // *Wetlands Ecology and Management*. 2008. Vol. 16. P. 139–153.

Kutenkov S. A., Kuznetsov O. L., Kantserova L. V., Mironov V. L., Ignashov P. A., Talbonen E. L., Vasyuta V. S. Phytomass carbon pools of Koivulambisuo mire system (South Karelia) // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2024. No. 15(1). P. 68–73. doi: 10.18822/edgccc635207

Laine A. M., Bubier J., Riutta T., Nilsson M. B., Vasander H., Tuittila E. S., Moore T. R. Abundance and composition of plant biomass as potential controls for mire net ecosystem CO₂ exchange // *Botany*. 2012. Vol. 90, no. 1. P. 63–74. doi: 10.1139/b11-068

Purra A. H., Penttilä T., Ojanen P., Minkkinen K., Aurela M., Lohila A., Ilomets M. Carbon dioxide fluxes and vegetation structure in rewetted and pristine peatlands in Finland and Estonia // *Boreal Environ. Res*. 2019. Vol. 24. P. 1–6.

References

Bobkova K. S., Tuzhilkina V. V. Carbon content and caloric content of organic matter in forest ecosystems of the North. *Ekologiya = Ecology*. 2001;1:69–74. (In Russ.)

Bobkova K. S., Zagirova S. V. (eds.). Carbon in forest and swamp ecosystems of protected areas of the Komi Republic. Syktывkar: Komi NTs URO RAN; 2014. 202 p. (In Russ.)

Boch M. S., Mazing V. V. Ecosystems of swamps in the USSR. Leningrad: Nauka; 1979. 187 p. (In Russ.)

Cherepanov S. K. Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR). St. Petersburg: Mir i sem'ya; 1995. 992 p. (In Russ.)

Degteva S. V., Ponomarev V. I. (eds.). Cadastre of specially protected natural territories of the Komi Republic. Syktывkar: Komi NTS URO RAN; 2014. 428 p. (In Russ.)

Efremova S. P., Efremova T. T., Bloiten V. Biological productivity and carbon pool of phytomass of forest swamps of Western Siberia. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2005;1:29–44. (In Russ.)

Elina G. A., Kuznetsov O. L., Maksimov A. I. Structural and functional organization and dynamics of swamp ecosystems in Karelia. Leningrad: Nauka, 1984. 128 p. (In Russ.)

Forest taxation: methodological guidelines. St. Petersburg: SPbGLTU; 2014. 59 p. (In Russ.)

Golovatskaya E. A. Biomass and production of the wood layer of the pine-shrub-sphagnum swamps of the southern taiga of Western Siberia. *Lesovedenie = Forest Science*. 2017;2:102–110. (In Russ.). doi: 10.31857/S0024114822040052

Grabovik S. I., Kantserova L. V. Long-term monitoring of vegetation cover in drained swamps of South Karelia (on the example of a mesotrophic grass-sphagnum swamp). *Ekologiya = Ecology*. 2023;1:13–21. (In Russ.). doi: 10.31857/S0367059723010067

Ipatov V. S., Mirin D. M. Description of phytocenosis. Methodological recommendations. St. Petersburg: SPbGU; 2008. 70 p. (In Russ.)

Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E. A., Abolina A., Akatova T. V., Baisheva E. Z., Bardunov L. V., Baryakina E. A., Belkina O. A., Bezgodov A. G., Boychuk M. A., Cherdantseva V. Ya., Czernyadjeva I. V.,

- Doroshina G. Ya., Dyachenko A. P., Fedosov V. E., Goldberg I. L., Ivanova E. I., Jukoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S. G., Kharzinov Z. Kh., Kurbatova L. E., Maksimov Ya. I., Mamatkulov U. K., Manakyan V. A., Maslovsky O. M., Napreenko M. G., Otnyukova T. N., Partyka L. Ya., Pisarenko O. Yu., Popova N. N., Rykovsky G. F., Tubanova D. Ya., Zheleznova G. V., Zolotov V. I. Check-list of mosses of East Europe and North Asia. *Arctoa*. 2006;15:1–130. doi: 10.15298/arctoa.15.01
- IPCC: Summary for Policymakers. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2021. P. 3–32. doi: 10.1017/9781009157896.001
- Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation. *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. P. 63–76.
- Joosten H., Tannenberger F., Moen A. Mires and peatlands of Europe. Status, distribution and conservation. Spain; 2017. 780 p. doi: 10.1127/mreseurope/2017/0001-0001
- Kazimirov N. I., Volkov A. D., Zyabchenko S. S. Metabolism and energy exchange in the pine forests of the European North. Leningrad: Nauka; 1977. 304 p. (In Russ.)
- Kopoteva T. A., Kuptsova V. A. Dynamics of phytomass and production on reclaimed mesotrophic mire during repeated water-logging process in the lower Amur region. *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'nye izmeneniya klimata = Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2016;7(2):3–12. (In Russ.)
- Kopoteva T. A., Kosykh N. P. Comparative assessment of the structure of phytomass and productivity of mesotrophic shrub-sphagnum swamps of the taiga zone. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2011;2:301–307. (In Russ.)
- Koronatova N. G., Kosykh N. P. Productivity of the tree tier in the upper marshes in the taiga zone of Western Siberia. *Lesovedenie = Forest Science*. 2022;4:432–448. (In Russ.). doi: 10.31857/S0024114823010035
- Koronatova N. G. Carbon reserve of the tree tier of the upland swamp in Western Siberia. *Nauchnye osnovy ustoychivogo upravleniya lesami: Mat-ly Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem (Moskva, 25–29 aprelya 2022) = Scientific foundations of sustainable forest management: proceedings of the All-Russian conf. with int. part. (Moscow, April 25–29, 2022)*. Moscow: CEPL; 2022. P. 230–232. (In Russ.)
- Kosykh N. P., Koronatova N. G. Reserves of total phytomass and pure primary production of swamp ecosystems of the Surgut Polesie. *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'nye izmeneniya klimata = Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2010;1(2):41–46. (In Russ.)
- Kosykh N. P., Koronatova N. G., Stepanova V. A. Vegetation and productivity of swamp ecosystems of the Yugansky Reserve. *Dinamika okruzhayushchei sredy i global'nye izmeneniya klimata = Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2018;9(1):53–61. (In Russ.). doi: 10.17816/edgcc8950
- Kosykh N. P., Makhatkova I. D. The structure of plant matter in the forest-marsh ecosystems of the middle taiga of Western Siberia. *Vestnik TGPU = Bulletin of TSPU*. 2008;4(78):77–80. (In Russ.)
- Kosykh N. P., Koronatova N. G., Mironycheva-Tokareva N. P., Vishnyakova E. K., Ivchenko T. G., Kurbatskaya S. S., Peregon A. M. The bogs in a forest – steppe region of Western Siberia: plant biomass and net primary production (NPP). *Water*. 2023;15(20):3526. doi: 10.3390/w15203526
- Kosykh N. P., Koronatova N. G., Naumova N. B., Titlyanova A. A. Above-and below-ground phytomass and net primary production in boreal mire ecosystems of Western Siberia. *Wetlands Ecology and Management*. 2008;16:139–153.
- Kuchko A. A., Matyushkin V. A. Aboveground phytomass of birch forests of south Karelia and its change with the age of stands. *Lesnye rastitel'nye resursy yuzhnoi Karelii = Forest plant resources of South Karelia*. Petrozavodsk: Karelia; 1971. P. 41–56. (In Russ.)
- Kutenkov S. A., Kuznetsov O. L., Kantserova L. V., Mironov V. L., Ignashov P. A., Talbonen E. L., Vasyuta V. S. Phytomass carbon pools of Koivulambisuo mire system (South Karelia). *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2024;15(1):68–73. doi: 10.18822/edgcc635207
- Kuznetsov O. L. (ed.). Methods of research of marsh ecosystems of the taiga zone. Leningrad: Nauka; 1991. 128 p. (In Russ.)
- Laine A. M., Bubier J., Riutta T., Nilsson M. B., Vasander H., Tuittila E. S., Moore T. R. Abundance and composition of plant biomass as potential controls for mire net ecosystem CO₂ exchange. *Botany*. 2012;90(1):63–74. doi: 10.1139/b11-068
- Leonova O. A., Bakhmat I. V., Soldatova A. V., Volkova E. M. Reserve of organic matter in the above-ground part of plant communities of different types of marshes of the Tula Region. *XII Galkinskie chteniya – Tipy bolot regionov Rossii: Mat-ly konf. (Sankt-Peterburg, 3 fevralya 2023 g.) = XII Galkin Readings – Types of swamps in Russia: conference proceedings (St. Petersburg, Feb. 3, 2023)*. St. Petersburg: BIN RAN; 2023. P. 76–79. (In Russ.)
- Medvedeva V. M., Egorova N. V., Antipin V. K. Biological cycle of nitrogen and ash elements in some types of swampy forests and marshes. *Statsionarnoe izuchenie zabolochennykh lesov i bolot v svyazi s melioratsiei = Stationary study of swampy forests and marshes in connection with land reclamation*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1977. P. 123–147. (In Russ.)
- Miglovets M. N., Goncharova N. N. Biological productivity of aapa marshes of the Pechora River basin. *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh sistem: Mat-ly XVI Vseros. nauch.-prakt. konf. c mezhdunar. uchastiem (g. Kirov, 3–5 dekabrya 2018 g.) = Biodiagnostics of the state of natural and man-made systems: Proceedings of the XVI All-Russ. scientific and practical conf. with int. part. (Kirov, Dec. 3–5, 2018)*. Book 1. Kirov: VyatGU; 2018. P. 84–87. (In Russ.)
- Mironycheva-Tokareva N. P., Shibareva S. V., Gromadka P. Reserves of phytomass and nutrients

deposited in it in the grass swamp of Poland. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2009;16(2):261–267. (In Russ.)

P'yavchenko N. I. Biological productivity and the circulation of substances in the swamp forests of Western Siberia. *Lesovedenie = Forest Science*. 1967;3:32–43. (In Russ.)

Pristova T. A. Carbon content in plants of the middle taiga deciduous phytocenoses of the Komi Republic. *Principy ekologii = Principles of Ecology*. 2022;3:43–49. (In Russ.). doi: 10.15393/j1.art.2022.12402

Purre A. H., Penttilä T., Ojanen P., Minkkinen K., Aurela M., Lohila A., Ilomets M. Carbon dioxide fluxes and vegetation structure in rewetted and pristine peatlands in Finland and Estonia. *Boreal Environ. Res*. 2019;24:1–6.

Rodin L. E., Remezov N. P., Bazilevich N. I. Methodological guidelines for studying dynamics and biological cycle in phytocenoses. Leningrad: Nauka; 1968. 145 p. (In Russ.)

Safin M. G. Forest conditions and phytocenoses of the sphagnum swamps of the Mari Polesie: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 2011. 22 p. (In Russ.)

Titlyanova A. A., Vishnyakova E. K. Changes in productivity of marsh and grass ecosystems along the latitudinal gradient. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda = Soils and the Environment*. 2022;5(2):32–50. (In Russ.). doi: 10.31251/pos.v5i2.176

Usol'tsev V. A., Zalesov S. V. Methods for determining biological productivity of plantings. Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekhn. un-t; 2005. 147 p. (In Russ.)

Yurkovskaya T. K. Higher units of vegetation classification in swamps. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1995;80(11);28–33. (In Russ.)

Vagina T. A., Shatokhina N. G. Dynamics of reserves of aboveground and underground organic matter of steppe, meadow and marsh phytocenoses. *Struktura, funktsionirovanie i evolyutsiya sistemy biogeotsenozov Baraby. Biogeotsenoticheskie protsessy = Structure, functioning and evolution of the Baraba biogeocenosis system. Biogeocenotic processes*. Vol. 2. Novosibirsk: Nauka; 1976. P. 217–264. (In Russ.)

Vomperskii S. E., Ivanov A. I. Vertical fractional structure and primary production of pine forests of the swamp series. *Lesovedenie = Forest Science*. 1978;6:13–23. (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 01.07.2025; принята к публикации / accepted: 30.10.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Пристова Татьяна Александровна

канд. биол. наук, научный сотрудник отдела лесобиологических проблем Севера

e-mail: pristova@ib.komisc.ru

Мигловец Михаил Николаевич

канд. биол. наук, научный сотрудник отдела лесобиологических проблем Севера

e-mail: miglovets@ib.komisc.ru

Гончарова Надежда Николаевна

канд. биол. наук, научный сотрудник отдела лесобиологических проблем Севера

e-mail: goncharova@ib.komisc.ru

Загирова Светлана Витальевна

д-р биол. наук, заведующая отделом лесобиологических проблем Севера

e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

CONTRIBUTORS:

Pristova, Tatiana

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Miglovets, Mikhail

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Goncharova, Nadezhda

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Zagirova, Svetlana

Dr. Sci. (Biol.), Head of Department

УДК 597.553.2-152.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ЛОСОСЯ *SALMO SALAR* L. РЕКИ ПОНОЙ

А. В. Ткаченко

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» (ПИНРО им. Н. М. Книповича)
(ул. Академика Книповича, 6, Мурманск, Россия, 183038)

Объект исследования – атлантический лосось (семга) р. Поной (Кольский п-ов, Россия). Популяция лосося этой реки является одной из наиболее крупных, обитает в труднодоступной части региона и в наименьшей степени подвержена антропогенному воздействию. Проведенные ранее исследования структуры нерестового стада, динамики анадромной и катадромной миграций, распределения молоди на нерестово-выростных участках позволяют в какой-то степени решать оперативные вопросы регулирования рыболовства. Между тем сохранение имеющегося ресурса и повышение его продуктивности требует разработки теоретических основ управления запасом, что, в свою очередь, невозможно без знания закономерностей динамики численности популяции. Для достижения цели использовали метод имитационного математического моделирования. Количественный метод, нашедший широкое применение для изучения динамики численности и оптимизации промысла различных видов рыб, доказал свою состоятельность. В отношении популяции атлантического лосося р. Поной подобное исследование осуществлено впервые. На имитационной математической модели, раздельно описывающей внутривидовые процессы и привносимые случайные эффекты, исследовали динамические свойства популяции. Проанализировали последствия воздействия промысла разной интенсивности на ее поведение. Установили, что в поведении модельной популяции присутствует собственная периодическая компонента, проявляющаяся в виде гармонических незатухающих колебаний. Увеличение промысловой нагрузки до некоего оптимума постепенно приводит к затуханию автоколебаний и переходу системы к равновесному состоянию с одновременным ростом численности до максимума, наблюдаемого при изъятии 73 % нерестового стада. Чрезмерный промысел (90 % изъятия и более) ведет к исчезновению популяции в течение нескольких десятилетий. Выяснили, что из воздействий факторов среды определяющее влияние на популяцию оказывает температура в период ската и первого года морского нагула. Моделирование ситуаций, связанное с форсированным введением в модель разных температурных условий, показало, что понижение температуры до уровня нижней границы возможного диапазона значений сглаживает амплитуду автоколебания, а повышение – существенно увеличивает. Случайные изменения температуры приводят систему к колебаниям неопределенного характера. Модель рекомендована как основа для мониторинга, прогноза численности запаса семги в р. Поной и управления промыслом.

Ключевые слова: атлантический лосось; река Поной; динамика численности; моделирование; воздействие промысла и условий среды; управление запасом

Для цитирования: Ткаченко А. В. Исследование динамики численности атлантического лосося *Salmo salar* L. реки Поной // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 67–76. doi: 10.17076/eco2115

Финансирование. Исследования проведены в рамках государственной работы «Рыболовство в научно-исследовательских и контрольных целях». Уникальный номер реестровой записи 720000Ф.99.1.БП51АА01000 (часть II раздел 10 государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076-00001-24-00).

A. V. Tkachenko. A STUDY OF THE ABUNDANCE DYNAMICS OF THE PONOI RIVER ATLANTIC SALMON *SALMO SALAR* L.

Polar Branch of FSBSI 'VNIRO' ('PINRO' named after N. M. Knipovich) (6 Akademika Knipovicha St., 183038 Murmansk, Russia)

The object of the research is Atlantic salmon in the Ponoï River (Kola Peninsula, Russia). The river harbors one of the largest Atlantic salmon populations, which lives in a poorly accessible part of the region and is less affected by human activities. Earlier research of the brood stock structure, upstream and downstream migrations, distribution of juveniles in spawning and feeding grounds provide data to address some operational issues of fisheries regulation. Meanwhile, elaboration of a theoretical framework for the stock management is crucial both for conserving the existing stock and for augmenting its productivity, but cannot be accomplished without expertise on the population abundance dynamics. To this end, mathematical simulation was applied. Broadly used to study abundance dynamics and to streamline fisheries, the quantitative approach proved to be efficient. This was the first time when such a research was conducted for Atlantic salmon of the Ponoï River. The mathematical simulation model provides separate descriptions of the processes within a population and of random exterior effects, and it was used to study the dynamic properties of the population. Impacts of fisheries of varying intensity on the population's behaviour were studied. The behaviour of the simulated population was found to have its own periodical component represented by harmonic sustained oscillations. An increase in the fisheries effort up to some best possible value results in oscillation damping, renders the system steady and leads to abundance growth to a maximum value, which occurs when 73 % of the brood stock is harvested. Overfishing (90 % harvest or more) entails the collapse of a population within several decades. Temperature during downstream migration and the first year at sea was found to be the most crucial environmental driver for the population. Simulation with different temperature modes proved that a decrease in temperature to the lower end of the potential range evens out the auto-oscillation, while an increase makes it more variable. Random changes in temperature bring some fuzzy fluctuations into the system. The simulation can be recommended for use in monitoring and prediction of Atlantic salmon abundance in the Ponoï River, and in managing fisheries.

Keywords: Atlantic salmon; the Ponoï River; abundance dynamics; simulation; impacts of fisheries and environment; stock management

For citation: Tkachenko A. V. A study of the abundance dynamics of the Ponoï River Atlantic salmon *Salmo salar* L. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 67–76. doi: 10.17076/eco2115

Funding. The research was conducted under the annual Government contract "Fisheries for scientific and monitoring purposes".

Введение

Река Поной – самый протяженный водоток Мурманской области, населенный атлантическим лососем *Salmo salar* L. (рис. 1). Его длина 425,7 км, а площадь водосборного бассейна, вытянутого в широтном направлении, составляет 15 467,2 км² [Зубченко и др., 2018]. В реку впадает 244 притока первого порядка. В верхнем и среднем течении река почти не имеет

нерестилиц и выростных участков (НВУ), пригодных для развития молоди лосося, поэтому воспроизводство семги осуществляется в притоках среднего и нижнего течения, а также в основном русле нижнего течения [Прусов, 2004].

Развитие семузьего промысла в р. Поной началось в XVI веке. Промысел был нерегулируемый, семгу отлавливали сетными орудиями лова разных конструкций на протяжении всей реки, порой перекрывая сетями нерестовые

притоки [Смирнов, 1935]. Начиная с 1964 г. по инициативе ПИНРО [Азбелев, Лагунов, 1958] лов лосося в крупных лососевых реках, в т. ч. на р. Поной, был сконцентрирован на рыбоучетном заграждении (РУЗ), ежегодно устанавливаемом в приливной зоне в районе одноименного села. Отлов нерестовых мигрантов осуществлялся в режиме «день лова – день пропуска», что обеспечивало устойчивое воспроизводство семги и сбор репрезентативной биологической информации из уловов. В этот же период существовал промышленный лов на приустьевой акватории Белого моря ставными неводами. Любой другой лов семги был запрещен. Заграждение функционировало ежегодно вплоть до 1993 г. В результате собран большой непрерывный ряд статистических и биологических данных о популяции семги р. Поной.

С 1994 г. промышленный лов семги в р. Поной был прекращен, уступив место гораздо более экономически выгодному любительскому рыболовству, в основном по принципу «поймал-отпустил». Численность заходящей на нерест семги стали определять методом мечения и повторной поимки [Прусов и др., 2005].

За продолжительный период исследований биологии семги в р. Поной накоплен значительный набор данных, описывающих динамику нерестовой миграции и статистику промысла [Смирнов, 1935; Гринюк, 1977], возрастную и половую структуру производителей [Неклюдов, 1990; Неклюдов, Егорова, 1993]. Определена выживаемость лосося на разных этапах жизни, рассмотрена связь цикличности подходов

с температурными условиями нагула [Азбелев, 1966; Гринюк, 1977], оценена продукционная возможность реки [Прусов, 2004]. Кроме того, изучалось питание молоди [Гринюк, Шустов 1977], оценивались межгодовые изменения плотности расселения молоди на НВУ [Прусов и др., 2021; Прусов, Ткаченко, 2023], определены критерии управления запасом [Whoriskey et al., 2000], результаты переориентации промысловой эксплуатации запаса на любительский лов [Ткаченко, Зубченко, 2024], численность семги методом мечения и повторной поимки [Прусов, Неклюдов, 2000]. Изучены и другие частные вопросы, затрагивающие биологию и среду обитания лосося.

Полученные фрагментарные оценки не позволяют оценить системные свойства объекта исследования. Для того чтобы узнать, как тот или иной фактор может влиять на популяционную динамику в целом, необходимо свести их в единую систему.

Достаточный объем данных по биологии семги и статистике промысла дает возможность сделать объективную оценку популяционной динамики с помощью имитационного математического моделирования. Этот метод нашел широкое применение в изучении динамики численности и оптимизации промысла различных рыб [Данилов и др., 2018] и доказал свою состоятельность.

Целью работы является изучение закономерностей динамики численности популяции семги р. Поной посредством имитационного математического моделирования.

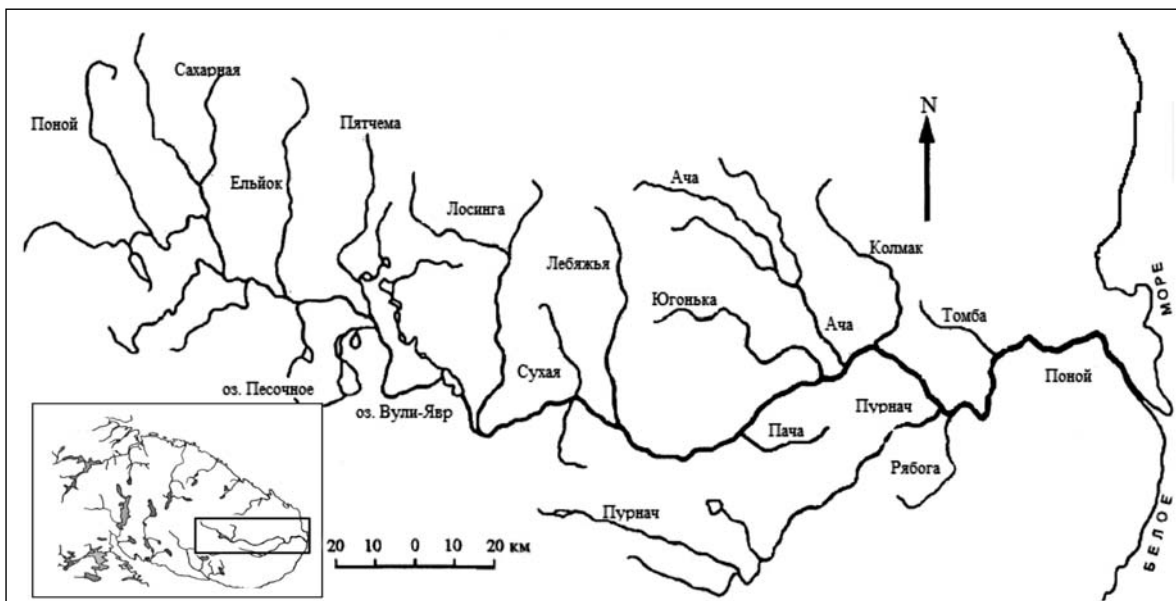


Рис. 1. Схема р. Поной.

Fig. 1. The schematic map of the Ponoï River

Материалы и методы

В качестве материала служил набор промыслово-биологических данных, полученных за годы работы РУЗ (1964–1993 гг.), включающий результаты прямого учета производителей, данные о возрастном, половом составе и плодовитости самок разного возраста. Сведения, собранные в период работы РУЗ, использованы потому, что этот способ учета и получения данных является более надежным, чем иные способы оценки запаса. Функционирование РУЗ в устьевой зоне реки обеспечивает наиболее полный учет нерестовых мигрантов.

Помимо промыслово-биологических данных использовали информацию о среднегодовой температуре воды в Баренцевом море на разрезе «Кольский меридиан» [Карсаков, 2009].

Для достижения поставленной цели нами применена математическая модель, разработанная ранее в качестве инструмента прогнозирования [Алексеев, 2003, 2004] и адаптированная применительно к популяции семги р. Поной. Блок-схема модели представлена на рис. 2.

Модель состоит из нескольких функциональных разделов, описывающих жизненный цикл семги, начиная от икры и заканчивая нерестовой миграцией производителей. Каждый последующий раздел использует данные, полученные предыдущим, и в свою очередь формирует исходные данные для последующего.

Процесс формирования пополнения описан уравнением Рикера [Ricker, 1954], где N_i – величина пополнения в год i (молодь в возрасте 1 год), E – величина запаса (количество икры, содержащейся в самках, составляющих нерестовое стадо), A и B – коэффициенты, значения которых задавались методом подбора таким образом, чтобы в условиях промысловой нагрузки, существовавшей в рассматриваемый период, средняя численность нерестового стада находилась на среднем в этот же период уровне.

Естественная смертность (M_i) на мальковом этапе жизни, как и в период морского нагула, начиная с возраста 1SW и далее (M_j), принималась постоянной. Процесс естественной убыли во всех случаях описан классическим уравнением Ф. И. Баранова [1918]. Мгновенный коэффициент естественной смертности в эти периоды полагался равным $0,2 \text{ год}^{-1}$. Смертность в период от смолта до окончания первого года нагула в море полагалась линейно связанной с температурой в море. Эту связь задавали уравнением линейной регрессии.

Процентное соотношение смолтов, скатывающихся в море в том или ином возрасте (Sm_k), определялось как доля (P_k) от общего числа смолтов (Sm). Аналогичным образом описывалось относительное количество рыб разного возраста, достигших начала полового созревания и совершающих нерестовую миграцию.

Индивидуальная абсолютная плодовитость (ИАП) самок разного возраста существенно

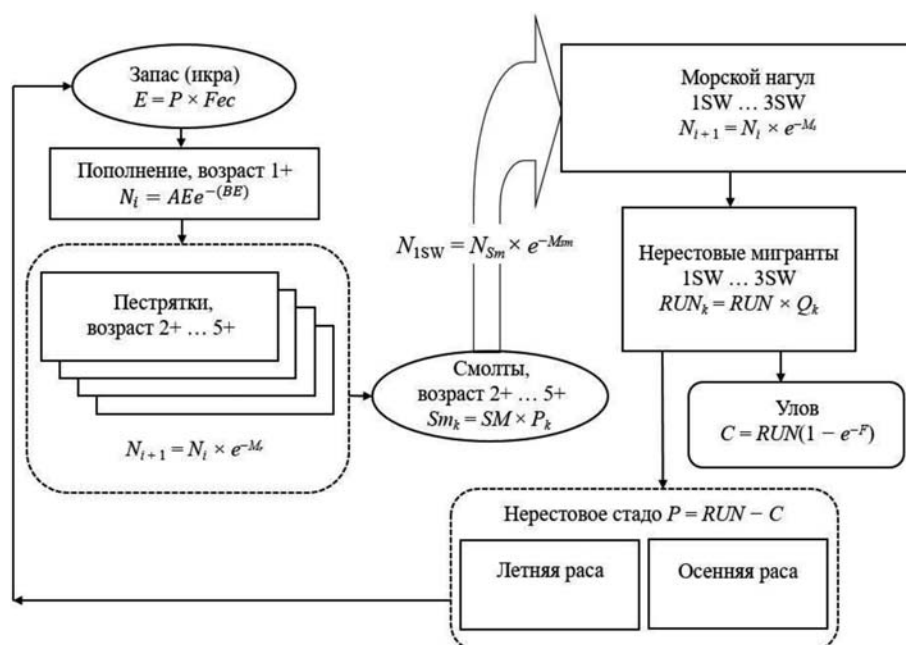


Рис. 2. Блок-схема имитационной модели

Fig. 2. The simulation chart

различается. Это обстоятельство также учтено в модели. В качестве исходных использованы усредненные показатели ИАП самок разного возраста, встречающиеся в литературных источниках [Неклюдов, Егорова, 1993], и собственные данные.

Усредненные показатели возраста наступления катадромной и анадромной миграций, как и соотношение числа лососей летней и осенней биологических групп, также были получены на основании литературных [Неклюдов, Егорова, 1993; Прусов и др., 2021] и собственных данных.

Промыслом (C) изымается задаваемое количество нерестовых мигрантов (RUN). Величина промысловой (F) смертности полагается одинаковой в течение всего нерестового хода. Не изъятая промыслом часть нерестового стада формирует последующий фонд икры, с учетом того, что осенняя семга нерестится на год позже летней. Лососей, нерестующих повторно, в модель не включали, поскольку ранее проведенные исследования показали их слабое влияние на популяционную динамику по причине редкой встречаемости [Алексеев, 2003].

Алгоритм вычислений и графическое отображение полученных результатов создавались с использованием компьютерной программы Microsoft Excel. Схема модели охватывает период в 110 лет, шаг модели 1 год.

Результаты и обсуждение

Промысловый фактор является одной из ведущих причин межгодовых изменений численности рыб, поэтому в качестве приоритетного параметра, модифицирующего поведение модельной популяции, использованы различные значения коэффициента F – от нулевых до предельных. Промысловая смертность задавалась равномерно для всех возрастных групп и сезонных рас лососей.

Реализация модели показала, что в условиях отсутствия промысла и неизменных прочих условиях популяции лосося p . Поной свойственна собственная периодическая компонента, проявляющаяся в виде незатухающих автоколебаний, обусловленных математическими свойствами кривой пополнения, с периодом 12–13 лет и амплитудой от 6500 до 27 500 особей (рис. 3, а). Среднегодовая численность нерестового стада в этом случае составила 16 800 особей. При введении даже небольших значений коэффициента промысловой смертности ($0,2 \text{ год}^{-1}$ и более) автоколебания постепенно затухают (рис. 3, б) вплоть до перехода к стационарному уровню (равновесное состояние запаса), в то же время численность анадромных лососей возрастает до максимума 26 900 экз. в условиях равномерного изъятия 73 % нерестового запаса (рис. 3, с).

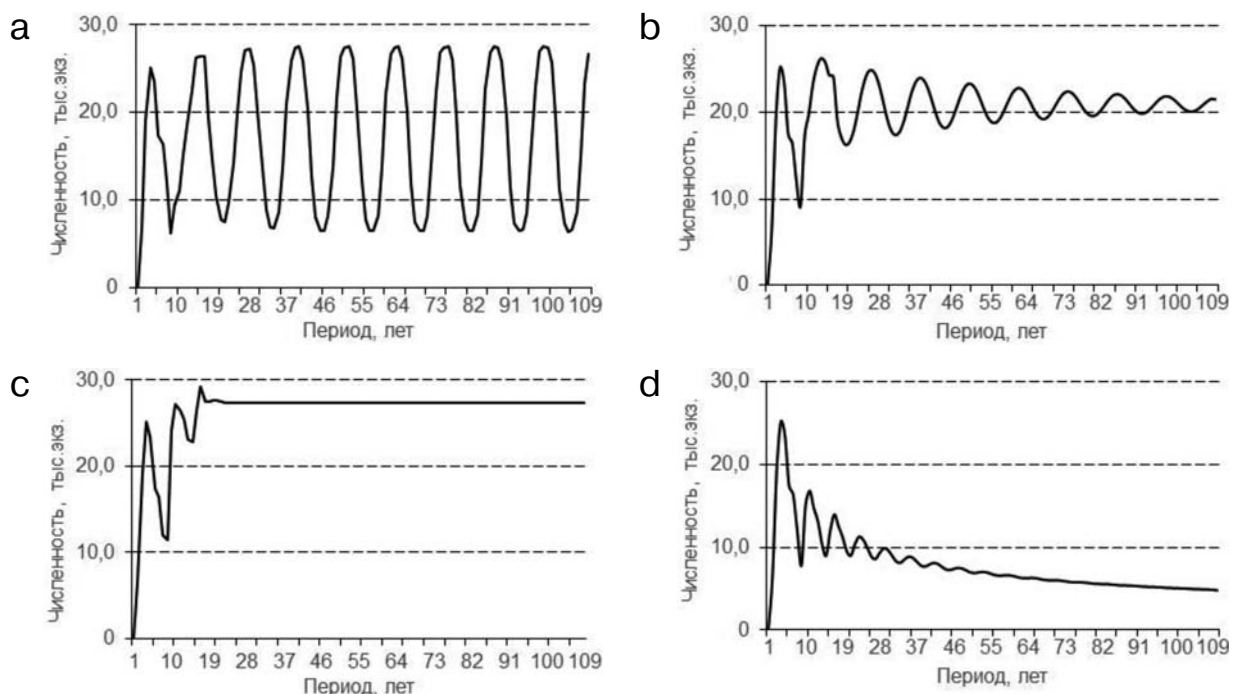


Рис. 3. Поведение модельной популяции в условиях разной промысловой смертности: $F = 0$ (а); $F = 0,4 \text{ год}^{-1}$ (б), $F = 1,2 \text{ год}^{-1}$ (с); $F = 2,3 \text{ год}^{-1}$ (д)

Fig. 3. The simulated population behaviour with different fishing mortality: $F = 0$ (a); $F = 0.4 \text{ year}^{-1}$ (b), $F = 1.2 \text{ year}^{-1}$ (c); $F = 2.3 \text{ year}^{-1}$ (d)

Дальнейшее увеличение промысловой смертности ведет к постепенному снижению численности лососей, а начиная со значений F , соответствующих уровню изъятия 90 % и более, – к скачкообразному переходу системы в неравновесное состояние и исчезновению запаса (рис. 3, d). Процесс вымирания популяции растягивается на десятилетия, в течение которых траектория, отражающая численность запаса, асимптотически стремится к нулевому значению. Чаще всего находящаяся под постоянным прессом негативного фактора популяция лосося может существовать долго, но численность ее невысокая, а биологическая структура не отличается разнообразием.

В качестве примера депрессивного состояния запаса, наступившего в результате многолетнего чрезмерного промысла, можно привести популяцию лосося р. Умба (бассейн Белого моря). Если еще в середине 90-х годов XX в. состояние ее воспроизводства оценивалось как удовлетворительное [Алексеев, Криксунов, 1999], то в начале XXI в. численность нерестового стада была более чем в два раза ниже уровня сохраняющего запаса [Зубченко и др., 2007], а уровень нелегального изъятия был оценен в 67–73 % [Алексеев и др., 2006]. В настоящее время в р. Умба заходит на нерест всего несколько сотен особей, а на многих НВУ молодь или не встречается, или плотность ее расселения крайне мала [Зубченко и др., 2021].

Поскольку уменьшение численности атлантического лосося наблюдается по всем рекам ареала, в отношении этого вида организацией по сохранению североатлантического лосося (NASCO) был рекомендован принцип «осторожного подхода» и выработаны критерии управления запасом [NASCO..., 1998]. В качестве практических мер для каждой популяции были установлены сохраняющие запасы (conservation limit) расчетные величины ежегодного количества производителей, которые должны быть пропущены на нерестилища во избежание нанесения ущерба воспроизводству. В отношении популяции лосося р. Поной эта величина была предварительно установлена на уровне 13 тысяч производителей [Prusov et al., 1999], а позже скорректирована до значения 7280 экземпляров [Прусов, 2004]. Модельный эксперимент подтвердил этот уровень, показав, что для достижения среднегодовой численности лосося в р. Поной на уровне максимального устойчивого вылова (MSY) требуется 7300 участвующих в нересте производителей.

Про влияние температуры, как интегрального фактора, повышающего или понижающего интенсивность процессов во всех звеньях

биологического воспроизводства в Северной Атлантике, известно давно [Ижевский, 1964; Азбелев, 1966]. Определяющее значение океанической температуры в динамике численности атлантического лосося отчетливо иллюстрируется моделированием ситуаций, связанных с форсированным введением различных температурных условий. Рассматривались отклики системы (промысел во всех случаях отсутствует) на введение в алгоритм модели постоянной среднегодовой температуры в Баренцевом море от 3,5 до 5 °С, то есть в наблюдаемых пределах. Повышение температуры приводит к более выраженной колебательной ритмике, с быстрым нарастанием амплитуды, без изменения величины периода (рис. 4, a). При снижении температур наблюдается переход к равновесному состоянию с одновременным уменьшением величины запаса (рис. 4, b).

В реальных условиях динамика океанической температуры тоже носит более или менее выраженный колебательный характер, что также было смоделировано (рис. 4, c). Температурные осцилляции морской среды задавались с периодом 8, 14 и 20 лет в пределах диапазона реально наблюдаемых значений за рассматриваемый период. В этом случае численность нерестового стада и колебания температуры демонстрируют синхронность (рис. 4, c). Случайное колебание температуры в указанных пределах приводит систему к колебаниям неопределенного характера (рис. 4, d).

Поскольку в процессе регулирования численности популяции могут участвовать, дополняя друг друга, разные внутренние и внешние факторы [Никольский, 1965], то в ситуации одновременного благоприятного их стечения возможны периодические подъемы численности. И напротив, воздействие нескольких неблагоприятных экологических причин способно привести к депрессии, иногда многолетней. Если к переменчивым условиям среды популяция в известной степени адаптирована, то в качестве основного фактора, способного нанести вред воспроизводству запаса, выступает чрезмерный промысел.

Нельзя не помнить и о влиянии некоторых биотических факторов, например инвазий и инфекций. Практика последних лет показывает, что в ряде рек Кольского полуострова на фоне роста нелегального лова [Самохвалов и др., 2014] популяции лосося страдают от вспышки заболевания невыясненной этиологии под общим названием УДН [Рудакова и др., 2024]. Это привело к снижению численности до уровня ниже сохраняющего запаса. Между тем известны примеры всплеска численности:

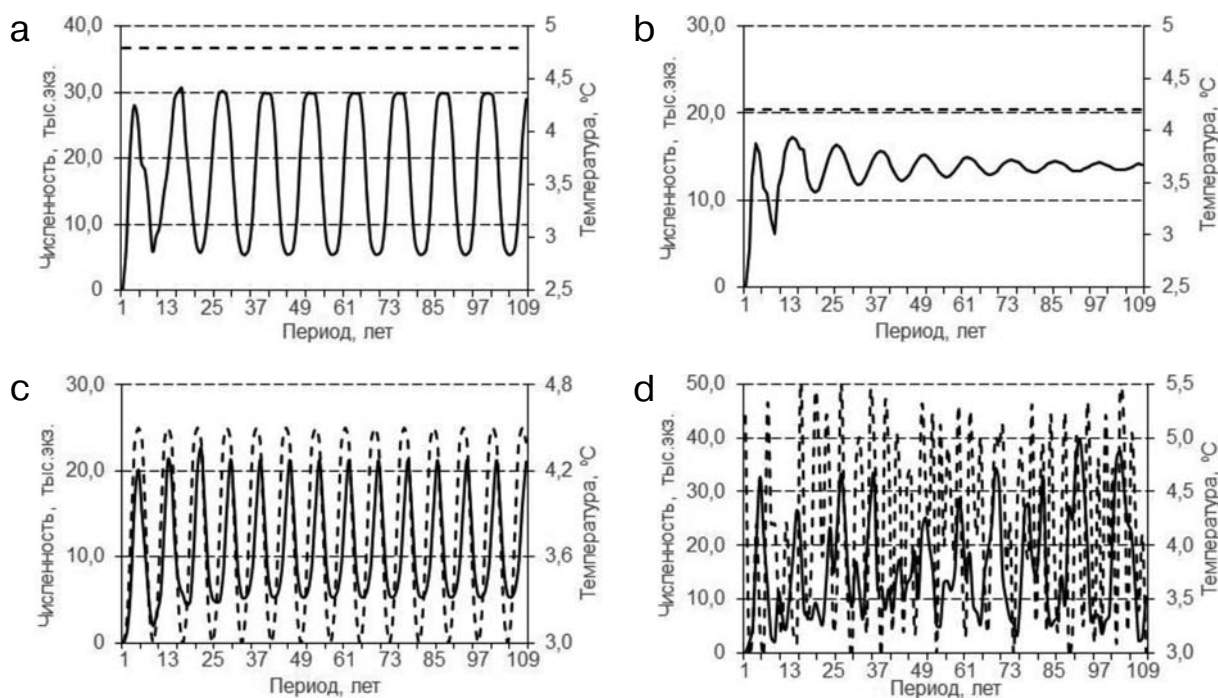


Рис. 4. Поведение модели при разных температурных условиях: морская температура 4,7 °С (а); 4,2 °С (б); при осцилляциях температуры (с); в условиях стохастической динамики температуры (д):

— численность; --- температура

Fig. 4. The simulation for different temperature conditions: sea temperature 4.7 °C (a); 4.2 °C (b); temperature oscillations (c); stochastic temperature dynamics (d):

— abundance, --- temperature

например, в реках Варзуга в 1975 и 1987 гг. [Зубченко и др., 2002], Тулома в 1961, 1974, 1990 гг. [Прусов и др., 2021], Кола в 1974 г. [Зубченко и др., 2003]. Чередование периодов уменьшения и роста численности должно рассматриваться как естественное состояние популяции, которая находится в процессе постоянной адаптации к переменным условиям существования.

Нетронутая природа восточной части Кольского полуострова благодаря неосвоенности сохранилась настолько, что может быть признана экосистемным эталоном, который необходимо сохранить для будущих поколений. Популяция семги р. Поной является одним из основных компонентов этой экосистемы. В настоящее время состояние воспроизводства данного вида оценивается как удовлетворительное.

Заключение

Модельные эксперименты показали, что механизм плотностной регуляции приводит популяцию атлантического лосося р. Поной к незатухающим автоколебаниям при неизменных условиях воспроизводства и отсутствия промысла. Постепенное увеличение промысловой

смертности приводит к затуханию осцилляций и достижению равновесного состояния. Максимальная численность (27 900 особей) наблюдается при изъятии 73 % нерестового стада. Оптимальное количество особей, принимающих участие в нересте, оценивается в 7300 экземпляров при равном соотношении полов.

Ведущим фактором среды, модифицирующим динамику численности, является температура морской воды. Ее влияние особенно заметно в первый год морского нагула. В это время происходит адаптация мигрирующей семги к морской воде. Форсированное введение в алгоритм модели высоких либо низких постоянных значений температуры вызывает соответственно увеличение амплитуды автоколебаний либо ее уменьшение вплоть до стабилизации численности. Колебательная ритмика температуры, задаваемая в модели, приводит к тому, что численность нерестового стада и колебания температуры демонстрируют синхронность.

Автор благодарит А. В. Зубченко и М. Ю. Алексееву за методическую помощь и конструктивные замечания к первоначальному варианту рукописи.

Литература

- Азбелев В. В. К вопросу о прогнозировании изменений численности семги рек Кольского полуострова // Материалы рыбохозяйственных исследований Северного бассейна. Вып. 7. Мурманск: ПИНРО, 1966. С. 96–101.
- Азбелев В. В., Лагунов И. И. О содержании работы рыбоучетных пунктов на семужьих реках Кольского полуострова // Науч.-техн. бюлл. ПИНРО. 1958. № 2(6). С. 50–52.
- Алексеев М. Ю. Динамика популяций семги (*Salmo salar* L.) рек Кольского полуострова: Дис. ... канд. биол. наук. М., 2004. 145 с.
- Алексеев М. Ю. Изучение динамики численности нерестового стада атлантического лосося реки Тулома с помощью математической модели // Вопросы рыболовства. 2003. Т. 4, № 2(14). С. 246–263.
- Алексеев М. Ю., Зубченко А. В., Криксунов Е. А. Применение имитационного математического моделирования для оценки величины нелегального вылова семги (*Salmo salar*) в реке Умба // Вопросы рыболовства. 2006. Т. 7, № 2(26). С. 318–325.
- Алексеев М. Ю., Криксунов Е. А. Современное состояние стада семги реки Умба // Адаптация и эволюция живого населения полярных морей в условиях океанического перигляциала / Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. С. 224–231.
- Баранов Ф. И. К вопросу о биологических основаниях рыбного хозяйства // Известия отдела рыболовства и научных промысловых исследований. 1918. Т. 1, вып. 1. С. 84–128.
- Гринюк И. Н. Промысел, воспроизводство и прогнозирование численности нерестового стада семги реки Поной // Труды ПИНРО. 1977. Вып. 32. С. 156–182.
- Гринюк И. Н., Шустов Ю. А. Биология сеголетков семги и молоди других рыб бассейна реки Поной // Труды ПИНРО. 1977. Вып. 32. С. 79–86.
- Данилов М. Б., Криксунов Е. А., Бобырев А. Е., Шереметьев А. Д., Мельник М. М., Северин С. О. Динамика популяции судака *Sander lucioperca* Псковско-Чудского озера // Вопросы ихтиологии. 2018. Т. 58, № 4. С. 450–463. doi: 10.1134/S0042875218040021
- Зубченко А. В., Алексеев М. Ю., Долотов С. И., Жилин А. Ю., Ермолаев В. В., Карасев А. Б., Кострова О. А., Кузьмин Д. О., Плотицына Н. Ф., Потуткин А. Г., Прусов С. В., Самохвалов И. В., Ткаченко А. В. Реестр лососевых рек Мурманской области. Бассейн Белого моря. Мурманск: ПИНРО, 2018. 308 с.
- Зубченко А. В., Веселов А. Е., Калюжин С. М. Биологические основы управления запасами семги в реке Варзуге и Варзугском рыбопромысловом районе: практические рекомендации. Мурманск-Петрозаводск, 2002. 77 с.
- Зубченко А. В., Калюжин С. М., Веселов А. Е., Алексеев М. Ю., Красовский В. В., Балашов В. В., Аликов Л. В. Особенности воспроизводства атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в реке Умба (Кольский полуостров). Петрозаводск: Скандинавия, 2007. 164 с.
- Зубченко А. В., Крылова С. С., Лазарева Л. В. Реки Кольского полуострова. Река Кола. Мурманск: ПИНРО, 2003. 66 с.
- Ижевский Г. К. Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства промысловых рыб. М.: ВНИРО, 1964. 165 с.
- Карсаков А. Л. Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900–2008 гг. Мурманск: ПИНРО, 2009. 139 с.
- Неклюдов М. Н. Биологическая структура и современная численность семги реки Поной // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря: Тез. докл. IV Региональн. конф. Архангельск, 1990. С. 173–175.
- Неклюдов М. Н., Егорова И. А. Биологическая характеристика семги р. Поной // Материалы отчетной сессии по итогам НИР ПИНРО в 1992 г. Мурманск: ПИНРО, 1993. С. 249–258.
- Никольский Г. В. Теория динамики стада рыб. М.: Наука, 1965. 379 с.
- Прусов С. В. Атлантический лосось (*Salmo salar* L.) реки Поной: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2004. 24 с.
- Прусов С. В., Зубченко А. В., Алексеев М. Ю., Ткаченко А. В., Самохвалов И. В., Долотов С. И., Кузьмин Д. О., Потуткин А. Г. Состояние запасов и рыболовства анадромных рыб Мурманской области. Мурманск: ПИНРО им. Н. М. Книповича, 2021. 72 с.
- Прусов С. В., Неклюдов М. Н. Состояние запаса атлантического лосося р. Поной // Материалы отчетной сессии ПИНРО по итогам научно-исследовательских работ в 1998–1999 гг. Мурманск: ПИНРО, 2000. Ч. 2. С. 40–48.
- Прусов С. В., Ткаченко А. В. Анадромные рыбы реки Поной. Мурманск: ВНИРО, 2023. 62 с.
- Прусов С. В., Уориски Ф. Г., Краббе С. Д. Численность атлантического лосося реки Поной // Биология, воспроизводство и состояние запасов анадромных и пресноводных рыб Кольского полуострова. Мурманск: ПИНРО, 2005. С. 183–191.
- Рудакова С. Л., Самохвалов И. В., Микряков Д. В., Иваницкая О. А., Семенихина М. Е., Суворова Т. А., Кузьмичева С. В. Язвенный дермальный некроз половозрелого атлантического лосося (УДН) в реках Кола и Тулома (Мурманская область): результаты и перспективы изучения // Труды ВНИРО. 2024. Т. 198. С. 34–46. doi: 10.36038/2307-3497-2024-198-34-46
- Самохвалов И. В., Прусов С. В., Зубченко А. В. Нелегальный лов атлантического лосося *Salmo salar* в бассейне Нижне-Тулومского водохранилища Мурманской области // Вопросы рыболовства. 2014. Т. 15, № 1. С. 111–117.
- Смирнов А. Г. Исследования биологии и промысла семги в реках восточной части Терского берега и на Мурмане в 1932 и 1933 гг. // Известия ВНИОРХ. 1935. Т. 20. С. 114–186.
- Ткаченко А. В., Зубченко А. В. Любительский лов атлантического лосося (*Salmo salar* L.) по принципу «поймал-отпустил» в нижнем течении р. Поной (Кольский п-ов) // Рыбное хозяйство. 2024. № 4. С. 73–79. doi: 10.36038/0131-6184-2024-4-73-79

Agreement on Adoption of a Precautionary Approach // Report of the fifteenth annual meeting of the Council NASCO. CNL(98)46. Edinburgh, 1998. 4 p.

Prusov S. V., Prischepa B. F., Krylova S. S. et al. Fisheries Status of stocks and management of Atlantic salmon in Russia in 1998 // ICES CM 1999/S:02. 1999. 9 p.

Ricker W. E. Stock and recruitment // J. Fish. Res. Board Canada. 1954. Vol. 11. P. 559–623. doi: 10.1139/f54-039

Whoriskey F. G., Prusov S. V., Crabbe S. Evaluation of the effects of catch-and-release angling on the Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) of the Ponoï River, Kola Peninsula, Russian Federation // Ecology of Freshwater Fish. 2000. Vol. 9, no. 1/2. P. 118–125. doi: 10.1034/j.1600-0633.2000.90114.x

References

Agreement on Adoption of a Precautionary Approach. Report of the fifteenth annual meeting of the Council NASCO. CNL(98)46. Edinburgh; 1998. 4 p.

Alekseev M. Yu. Abundance dynamics of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in rivers of the Kola Peninsula: PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 2004. 145 p. (In Russ.)

Alekseev M. Yu. Study of abundance of the Atlantic salmon spawning stock in the Tuloma River based on a mathematic simulation. *Voprosy rybolovstva = Problems of Fisheries*. 2003;4(2-14):246–263. (In Russ.)

Alekseev M. Yu., Kriksunov E. A. Current state of the salmon stock in the Uмба River. *Adaptatsiya i evolyutsiya zhivogo naseleniya polyarnykh morei v usloviyakh okeanicheskogo periglyatsiala = Adaptation and evolution of living organisms of the polar seas in the conditions of the oceanic periglacial*. Apatity: KSC RAS; 1999. P. 224–231. (In Russ.)

Alekseev M. Yu., Zubchenko A. V., Kriksunov E. A. Mathematical simulations used to estimate illegal Atlantic salmon (*Salmo salar*) fisheries in the Uмба River. *Voprosy rybolovstva = Problems of Fisheries*. 2006;7(2-26):318–325. (In Russ.)

Azbelev V. V. On the changes in the Atlantic salmon abundance in the rivers of the Kola Peninsula. *Materialy rybokhozyaystvennykh issledovaniï Severnogo basseina = Proceedings of the fisheries research of the Northern Basin*. Iss. 7. Murmansk: PINRO; 1966. P. 96–101. (In Russ.)

Azbelev V. V., Lagunov I. I. On functioning of counting fence posts in salmon rivers of the Kola Peninsula. *Nauch.-tekhn. byull. PINRO = Scientific-Technical Bulletin of PINRO (Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography)*. 1958;5(6):50–52. (In Russ.)

Baranov F. I. On the question of the biological basis of fisheries. *Izvestiya otdela rybovodstva i nauchnykh promyslovnykh issledovaniï = Scientific Committee of Agriculture. Bulletin of the Bureau of Fisheries*. 1918;1(1):84–128. (In Russ.)

Danilov M. B., Kriksunov E. A., Bobyrev A. E., Sheremet'ev A. D., Mel'nik M. M., Severin S. O. Dynamics of the Sander *luciperca* population in Lake Peipsi-Pihkva. *Journal of Ichthyology*. 2018;58(4):531–544. doi: 10.1134/S0032945218040021

Grinyuk I. N. Fishery, enhancement and projecting of abundance of the spawning stock of Atlantic salmon in the Ponoï River. *Trudy PINRO = Proceedings of PINRO (Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography)*. 1977;32:156–182. (In Russ.)

Grinyuk I. N., Shustov Yu. A. Biology of salmon fry and other species juveniles in the Ponoï River basin. *Trudy PINRO = Proceedings of PINRO (Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography)*. 1977;32:79–86. (In Russ.)

Izhevskii G. K. System basis for the forecast of ocean conditions and fish reproduction. Moscow: VNIRO; 1964. 165 p. (In Russ.)

Karsakov A. L. Oceanographic studies in the Kola section in the Barents Sea in 1900–2008. Murmansk: PINRO; 2009. 139 p. (In Russ.)

Nekludov M. N. Biological structure and present day Atlantic salmon abundance in the Ponoï River. *Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany prirodnykh resursov Belogo morya: Tez. dokl. IV regional'n. konf. = Issues of research, sustainable use and conservation of natural resources of the White Sea*. Arkhangelsk; 1990. P. 173–175. (In Russ.)

Nekludov M. N., Egorova I. A. Biological description of Atlantic salmon in the Ponoï River. *Materialy otchetnoi sessii po itogam NIR PINRO v 1992 g. = Proceed. of the 1992 PINRO Research Report Session*. Murmansk: PINRO; 1993. P. 249–258. (In Russ.)

Nikol'skii G. V. Theory of fish school dynamics. Moscow: Nauka; 1965. 379 p. (In Russ.)

Prusov S. V. Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) of the Ponoï River: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk; 2004. 24 p. (In Russ.)

Prusov S. V., Neklyudov M. N. Current state of Atlantic salmon in the Ponoï River. *Materialy otchetnoi sessii PINRO po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot v 1998–1999 gg. = Proceed. of the 1998–1999 PINRO Research Report Session*. Part 2. Murmansk: PINRO; 2000. P. 40–48. (In Russ.)

Prusov S. V., Prischepa B. F., Krylova S. S. et al. Fisheries Status of stocks and management of Atlantic salmon in Russia in 1998. *ICES CM 1999/S:02*. 1999. 9 p.

Prusov S. V., Tkachenko A. V. Anadromous fishes in the Ponoï River. Murmansk: VNIRO; 2023. 62 p. (In Russ.)

Prusov S. V., Whoriskey F. G., Crabbe S. D. Atlantic salmon abundance in the Ponoï River. *Biologiya, vosproizvodstvo i sostoyanie zapasov anadromnykh i presnovodnykh ryb Kol'skogo poluostrova = Biology, reproduction and stock state of anadromous and freshwater fishes of the Kola Peninsula*. Murmansk: PINRO; 2005. 320 p. (In Russ.)

Prusov S. V., Zubchenko A. V., Alekseev M. Yu., Tkachenko A. V., Samokhvalov I. V., Dolotov S. I., Kuz'min D. O., Potutkin A. G. The state of the stock and fisheries of anadromous fishes in the Murmansk Region. Murmansk: PINRO; 2021. 72 p. (In Russ.)

Ricker W. E. Stock and recruitment. *J. Fish. Res. Board Canada*. 1954;11:559–623. doi: 10.1139/f54-039

Rudakova S. L., Samokhvalov I. V., Mikryakov D. V., Ivanitskaya O. A., Semenikhina M. E., Suvorova T. A., Kuz'micheva S. V. Ulcerative dermal necrosis of mature Atlantic salmon in the Kola and Tuloma Rivers (Murmansk Region): results and prospects for studying

the problem. *Trudy VNIRO*. 2024;198(1):34–46. (In Russ.). doi: 10.36038/2307-3497-2024-198-34-46

Samokhvalov I. V., Prusov S. V., Zubchenko A. V. Illegal fishing of Atlantic salmon *Salmo salar* in the basin of the Nizhne-Tulomsky reservoir of the Murmansk Region. *Voprosy rybolovstva = Problems of Fisheries*. 2014;15(1):111–117. (In Russ.)

Smirnov A. G. Study of salmon biology and fisheries in the eastern part of the Tersky Coast and Murman in 1932–1933. *Izvestia VNIORKh = Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute of Lake and River Fisheries*. 1935;20:114–186. (In Russ.)

Tkachenko A. V., Zubchenko A. V. Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) catch-and-release fisheries in the lower Ponoï River (Kola Peninsula). *Rybnoe khozyaistvo = Fisheries*. 2024;4:73–79. (In Russ.). doi: 10.36038/0131-6184-2024-4-73-79

Whoriskey F. G., Prusov S. V., Crabbe S. Evaluation of the effects of catch-and-release angling on the Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) of the Ponoï River, Kola Peninsula, Russian Federation. *Ecology of Fresh-*

water Fish. 2000;9(1/2):118–125. doi: 10.1034/j.1600-0633.2000.90114.x

Zubchenko A. V., Alekseev M. Yu., Dolotov S. I., Zhilin A. Yu., Ermolaev V. V., Karasev A. B., Kostrova O. A., Kuz'min D. O., Plotitsyna N. F., Potutkin A. G., Prusov S. V., Samokhvalov I. V., Tkachenko A. V. Inventory of salmon rivers of the Murmansk Region. The White Sea basin. Murmansk: PIRNO; 2018. 308 p. (In Russ.)

Zubchenko A. V., Kalyuzhin S. M., Veselov A. E., Alekseev M. Yu., Krasovskii V. V., Balashov V. V., Alikov L. V. Features of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) reproduction in the Uмба River (Kola Peninsula). Petrozavodsk: Scandinavia; 2007. 164 p. (In Russ.)

Zubchenko A. V., Krylova S. S., Lazareva L. V. Rivers of the Kola Peninsula: The Kola River. Murmansk: PINRO; 2003. 66 p. (In Russ.)

Zubchenko A. V., Veselov A. E., Kalyuzhin S. M. Biological background for Atlantic salmon stock management in the Varzuga River and Varzuga fisheries area: practical guidelines. Murmansk-Petrozavodsk; 2002. 77 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 03.06.2025; принята к публикации / accepted: 30.10.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Ткаченко Артем Владимирович

заведующий лабораторией биоресурсов
внутренних водоемов

e-mail: tkach@pinro.vniro.ru

CONTRIBUTOR:

Tkachenko, Artem

Head of Laboratory

УДК 582.475+581.522.4:504.5.(470.21)

СОСТОЯНИЕ СОСНЫ СКРУЧЕННОЙ (*PINUS CONTORTA*) В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ (МУРМАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Л. Г. Исаева*, Н. С. Рябов

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН
(Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская область, Россия, 184209),

* l.isaeva@ksc.ru

В работе отражены результаты оценки состояния саженцев сосны скрученной *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. var. *latifolia* Engelm. в районе расположения комбината «Североникель» (АО «Кольская ГМК», г. Мончегорск). Изучены сохранность и состояние сосны скрученной с 2004 по 2022 г. За период наблюдений погибло более 90 % саженцев, оставшиеся 21 экз. сосен имеют среднюю высоту $1,2 \pm 0,1$ м, возраст хвои до трех лет, среднюю длину хвои текущего года $53,9 \pm 0,5$ мм, 71 % сосен имеют сухую вершину. Длина хвои саженцев сосны скрученной в 1,7–2 раза превышает длину хвои сосны обыкновенной. Концентрации основных загрязняющих веществ (Ni, Cu и S) в хвое в последние годы остаются высокими, особенно в 1–3-летней. Содержание основных элементов питания растений (K, Mn и P) в хвое текущего года снижается, а кальция – увеличивается. В почвенном слое (глубиной до 10 см) на участке ремедиации с сосной скрученной с 2005 по 2016 г. концентрация никеля увеличилась примерно в 3,5 раза, меди – в 1,4 раза. Ухудшение состояния саженцев сосны скрученной продолжается, усыхают верхушечные побеги. Полученные результаты свидетельствуют, что посадка сосны скрученной при ремедиации в зоне влияния выбросов комбината «Североникель» не рекомендуется.

Ключевые слова: загрязнение; техногенные пустоши; ремедиация; сосна скрученная

Для цитирования: Исаева Л. Г., Рябов Н. С. Состояние сосны скрученной (*Pinus contorta*) в условиях промышленного загрязнения (Мурманская область) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 77–89. doi: 10.17076/esc02089

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ИППЭС КНЦ РАН «Структурно-функциональная организация и динамика наземных экосистем Евро-Арктического региона» № 1023032200043-6.

L. G. Isaeva*, N. S. Ryabov. *PINUS CONTORTA* UNDER INDUSTRIAL AIR POLLUTION (MURMANSK REGION)

Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia), *l.isaeva@ksc.ru

The paper reports the results of monitoring lodgepole pine (*Pinus contorta*) saplings planted near Severonikel smelter (Monchegorsk) from 2004 to 2022. More than 90 % of the saplings died during this period, while the remaining 21 plants reached an average height of 1.2 ± 0.1 m, had needle age up to 3 years, current-year's needles 53.9 ± 0.5 mm long on average, and 71 % of the pines had a dry top. The needles of *P. contorta* were 1.7–2 times longer than the needles of *Pinus sylvestris*. Concentrations of the main pollutants (Ni, Cu, and S) in needles remained high in recent years, especially in needles 1–3 years old. The content of nutrients (Mg, K, Mn and P) in current-year's *Pinus contorta* needles was decreasing, while that of calcium increased. Between 2005 and 2016, topsoil (down to 10 cm depth) at the remediation site showed a 3.5-fold rise in the nickel concentrations and a 1.4-fold rise in copper. The condition of the *Pinus contorta* saplings continues to degrade. The planting of *Pinus contorta* cannot be recommended for remediating the Severonickel smelter's impact area.

Keywords: pollution; industrial wastelands; remediation; *Pinus contorta*

For citation: Isaeva L. G., Ryabov N. S. *Pinus contorta* under industrial air pollution (Murmansk Region). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 77–89. doi: 10.17076/eco2089

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to INEP KSC RAS "Structural and functional organization and dynamics of terrestrial ecosystems of the Euro-Arctic region" No. 1023032200043-6.

Введение

Сосна скрученная (*Pinus contorta* Dougl.) является одной из основных лесообразующих пород Северной Америки и имеет обширный естественный ареал [Раевский, Мордась, 2005; Федорков, Туркина, 2010]. Большой практический интерес к интродукции сосны скрученной проявляется в странах Северной Европы, где эта порода обнаруживает более быстрый рост, высокую выживаемость, длинную хвою с большей площадью поверхности, быстрое развитие корневой системы и более высокую продуктивность по сравнению с местными лесообразующими породами [Jansons et al., 2013; Алексеев и др., 2014]. Многие исследователи сообщают о перспективности лесовыращивания сосны скрученной на Европейском Севере России: в Республиках Карелия [Раевский, 2008–2010] и Коми [Федорков, Туркина, 2010; Гутый, Федорков, 2016], Ленинградской [Алексеев и др., 2014], Новгородской [Маркова, Жигунов, 1999], Вологодской [Бабич, Андропова, 2014; Корчагов и др., 2020] и Архангельской [Стафеев, 1989; Демидова и др., 2018] областях.

В Мурманской области до 2004 г. в лесных культурах или для озеленения городов сосна скрученная не использовалась. В Заполярье

рост и развитие хвойных пород происходит в экстремальных почвенно-климатических условиях: недостаток тепла, продолжительный зимний период, низкое плодородие почв [Крутов, 1989; Лукина, Никонов, 1998]. В районе г. Мончегорска расположен комбинат «Североникель» (АО «Кольская ГМК») – крупнейший источник выбросов (подкисляющих веществ и соединений тяжелых металлов) в атмосферу. Промышленные выбросы комбината распространяются на значительные расстояния, являясь причиной нарушений и повреждений лесов, произрастающих на этой территории [Влияние..., 1990; Проблемы... 2005; Цветков, Цветков, 2012]. Непосредственно к источникам промышленных выбросов примыкают «техногенные пустоши» с погибшей растительностью и эродированными почвами. Институтом проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (ИППЭС КНЦ РАН) в период с 1997 по 2000 г. были выполнены целенаправленные эксперименты по разработке научно обоснованных подходов к восстановлению территорий, нарушенных в условиях воздействия медно-никелевого производства [Лукина и др., 2005]. Результаты экспериментальных исследований показали, что оптимизация питательного режима методом внесения недостающих элементов в почву способствует развитию

пионерных сообществ из местных видов на территориях, занятых техногенными редколесьями и пустошами [Winterhalder, 1996; Лукина и др., 2005]. По рекомендациям, разработанным ИППЭС КНЦ РАН, и при финансовой поддержке АО «Кольская ГМК» в районе г. Мончегорска в 2003 г. Мончегорским лесхозом были начаты крупномасштабные работы по восстановлению растительности на техногенных пустошах [Исаева и др., 2011].

В условиях постоянно и длительно действующего комбината «Североникель» при восстановлении растительности предпочтительно использовать устойчивые к воздушному промышленному загрязнению местные листовенные породы: ива, береза, осина, рябина, ольха [Цветков, 1987; Лукина и др., 2005; Цветков, Цветков, 2012]. Многолетние экспериментальные исследования ИППЭС КНЦ РАН, результаты мониторинговых наблюдений и анализ почв на техногенных пустошах показывают невозможность использования хвойных пород в посадках на данном этапе восстановительных работ, тем более древесных видов интродуцентов. Кроме того, интродукция *Pinus contorta* в Швеции и Финляндии была существенно ограничена в связи с заражением посадок склеродерриозом, вызванным широким распространением патогена *Gremmeniella abietina* (Lagerb.) Morelet [Karlman et al., 1994; Hansson, 1996; Witzell, 2001]. Распространение патогенной микрофлоры обусловило принятие ограничительных мер и в других странах по дальнейшему интродуцированию экзотических видов сосны для защиты местных видов (*Pinus* и *Picea*) от инфекции. Известно, что в окрестностях г. Оленегорска (28 км на ССВ от г. Мончегорска) в середине 1990-х годов было много естественных очагов заражения *G. abietina* [Кайтера и др., 1996, 2001], а это значит, что культуры *P. contorta*, если выживут, вероятно, будут заражены в будущем побеговым раком. Сосна неместного происхождения в большей степени подвержена повреждению патогенами, включая побеговый рак [Stephan, Schulze, 1987; Witzell, Karlman, 2000], возбудителями болезней в северных лесах и может в дальнейшем служить очагом распространения инфекций на местные виды хвойных пород.

Осенью 2004 г. на участке бывшего выработанного песчаного карьера, расположенного в 4,5 км севернее комбината «Североникель», рекомендациями ИППЭС КНЦ РАН предусматривалась посадка листовенных древесно-кустарниковых пород. Тем не менее ООО НПО «Алкахест» (г. Архангельск) были привезены и высажены саженцы сосны скрученной, вариант широкохвойная – *Pinus contorta* Dougl.

ex Loud. var. *latifolia* Engelm. – как наиболее адаптированный к суровым климатическим условиям [Elfving et al., 2001]. Предположительно, саженцы сосны скрученной были взяты из плантаций хвойных интродуцентов дендрологического сада ФБУ «СевНИИЛХ имени В. Н. Нилова» [Демидова и др., 2016]. Учитывая рекомендации ИППЭС КНЦ РАН по использованию местных листовенных пород, Мончегорским лесхозом рядом с каждым саженцем сосны скрученной в ряду была посажена ива или береза (высотой до 1–1,5 м).

Интродукция древесных видов требует особого внимания при выращивании их в другом регионе, тем более на территории, нарушенной азротехногенным загрязнением. Исследований состояния сосны скрученной, высаженной на техногенной пустоши в условиях длительного промышленного загрязнения выбросами комбината «Североникель», ранее не проводилось.

Цель исследований: оценка состояния культур сосны скрученной (*Pinus contorta*) в условиях постоянного промышленного загрязнения выбросами медно-никелевого производства.

Материалы и методы

Объект исследований – саженцы сосны скрученной широкохвойной *Pinus contorta* var. *latifolia*, привезенные из Архангельска на автомобиле. Корни саженцев во время перевозки были укрыты сырым мхом. Более конкретная информация – происхождение семенного материала, возраст саженцев, место произрастания и другие характеристики – отсутствует, а за истечением срока давности получить ее не представляется возможным.

В 2004 г. на участке ремедиации (площадью 3,5 га) с применением инвестиционного подхода [Исаева и др., 2011] вместе с посадками листовенных древесно-кустарниковых пород на насыпной слой грунта, состоящего из торфа, опилок и песка, с одновременным внесением удобрений и посевом многолетних трав были высажены около 600 саженцев сосны скрученной. Саженцы с открытой корневой системой высаживались в лунки с размещением 1,5 м между рядами и 2 м в ряду.

В полевых условиях саженцы сосны периодически осматривали, измеряли высоту, определяли возраст хвои, в конце периода вегетации (август) отбирали пробы хвои и слоя почвы до 10 см глубиной. В 2008, 2011 и 2014 гг. пробы отбирали в местах, содержащих органический слой (торф) или минеральный. В работе использован коэффициент концентрации (Кс) – отношение концентрации элемента в хвое при

техногенной нагрузке к среднефоновому содержанию [Геохимия..., 1990]. Пробы хвои текущего года и 1–3 лет высушивали в комнатных условиях, определяли гигроскопическую влажность. Категории жизненного состояния саженцев оценивали по 6-балльной шкале [Алексеев, 1989; Влияние..., 1990; Методические..., 1990]. Индекс состояния (повреждения) определяли как средневзвешенное значение [Методические..., 1990] по формуле:

$$I_n = (n_1 K_1 + n_2 K_2 + \dots + n_6 K_6) / N,$$

где $n_1 \dots n_6$ – количество деревьев 1, 2...6 категорий жизненного состояния; $K_1 \dots K_6$ – баллы жизненного состояния категорий деревьев, соответствующие номеру категории; N – общее число учтенных деревьев на пробной площади.

В лабораторных условиях выполняли измерения длины хвои (не менее 500 шт.) по годам. Для сравнения данных по длине хвои использовали показатели длины хвои сосны обыкновенной, хвоя которой была отобрана в фоновых условиях (160 км в ЮЗ направлении) и в техногенном редколесье (10 км в южном направлении от комбината «Североникель»). Хвоя сосны обыкновенной отбиралась с трех деревьев, по пять веток с верхней трети кроны, в конце периода вегетации (август) и разбиралась по возрастам.

В ИППЭС КНЦ РАН аналитическими методами определяли:

- валовой анализ растительных проб после мокрого озоления азотной кислотой – методами атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной

спектрометрии, фотоколориметрическими методами анализа;

- концентрации металлов – методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии; доступные для растений концентрации элементов – методом экстракции 1М ацетатом аммония (рН = 4,65); фосфор и серу – колориметрическим методом.

Результаты и обсуждение

Осенью 2004 г. все сосны были в здоровом состоянии, с зеленой хвоей (длина хвои 6–10 см), высотой до 1,0–1,3 м, возрастом по мутовкам 3–10 лет (рис. 1). По результатам изучения хода роста культур сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) на территории Ленинградской области [Алексеев и др., 2014] двухлетние саженцы на третий год выращивания имели высоту от 85 до 100 см. Можем предположить, что и привезенные саженцы сосны скрученной для посадки вблизи г. Мончегорска были возрастом от 3 до 10 лет.

По данным АО «Кольская ГМК», выбросы сернистого газа в период с 2004 по 2020 г. составляли в среднем более 36 тыс. тонн/год, резкое сокращение SO_2 отмечено в 2021 и 2022 гг. (15,6 и 13,0 тыс. т/год соответственно); концентрации твердых веществ (никеля и меди) в атмосфере планомерно снижались с 1990-х гг., резкое сокращение выбросов твердых веществ Ni и Cu в атмосферу отмечено в 2001, 2021 и 2022 гг. Сильные разовые «выхлопы» сернистого газа зафиксированы летом 2014, 2016, 2018 и 2020 гг. В регионе зимой



Рис. 1. Саженцы сосны скрученной осенью 2004 г.

Fig. 1. Seedlings of *Pinus contorta*, autumn 2004

преобладают потоки ветра южных румбов, летом – северных направлений. Разовые выбросы высоких концентраций SO₂ вызывают резкое усыхание ассимилирующих органов древесных растений [Цветков, Цветков, 2012].

Периодический анализ проб верхнего слоя почвы на данном участке ремедиации показывает высокие концентрации основных загрязнителей доступных для растений соединений, максимальные концентрации никеля и меди в 2016 г. составили 241 и 601 мг/кг соответственно (рис. 2).

В условиях техногенного загрязнения изменяется соотношение Ni : Cu. В фоновых районах в хвое сосны обыкновенной оно варьирует от 0,4 до 1,0, в техногенных сосновых редко-

лесьях значения разнятся в пределах 2,1–3,8 [Сухарева, 2017], в хвое сосны скрученной это соотношение для хвои текущего года колеблется в пределах 4,4–10,7, а для хвои 1–3 лет – 2,5–10. Концентрации основных загрязняющих веществ (Ni, Cu и S) в хвое сосны скрученной за период с 2014 по 2022 г. имеют тенденцию к снижению, но все еще, по сравнению с фоном, остаются высокими (рис. 3, 4), особенно в хвое 1–3 лет. В хвое текущего года и 1–3 лет отмечено незначительное снижение этих элементов с 2014 по 2022 г. По величине коэффициента концентрации (K_с) содержания никеля и меди в ассимилирующих органах сосны скрученной на территории, подверженной загрязнению, определяются как аномальные (K_с ≥ 1,5).

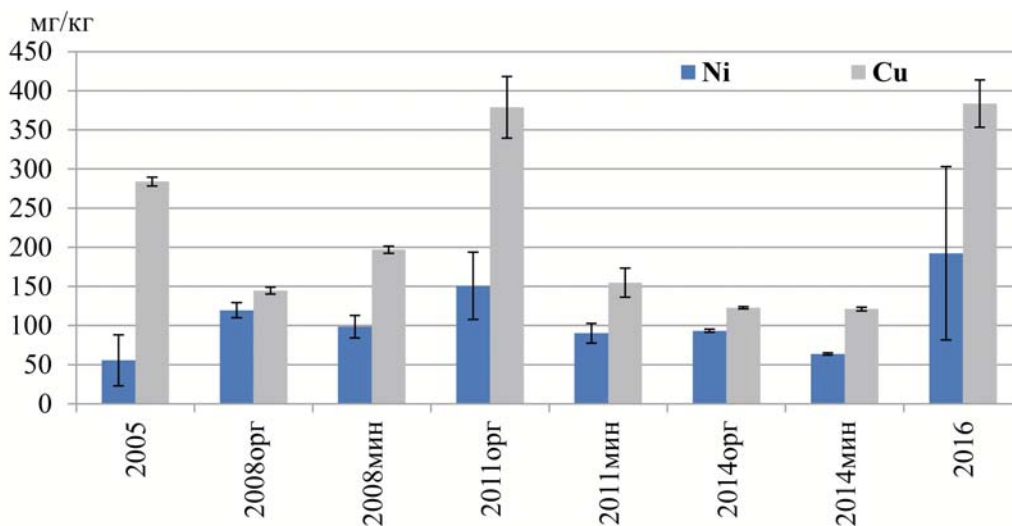


Рис. 2. Динамика содержания доступных для растений соединений никеля и меди в почвенном слое (до 10 см) по годам, мг/кг абс. сух. в-ва: орг – органический слой; мин – минеральный слой

Fig. 2. Dynamics of available nickel and copper compounds in the soil layer (up to 10 cm) by year, mg/kg abs. dry matter: орг – organic layer; мин – mineral layer

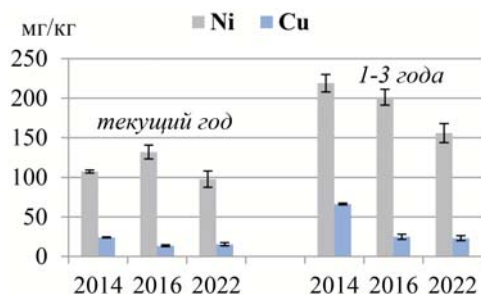


Рис. 3. Динамика содержания никеля и меди в хвое сосны скрученной по годам, мг/кг абс. сух. вещ-ва

Fig. 3. Dynamics of nickel and copper in pine needles of *Pinus contorta* by year, mg/kg abs. dry matter

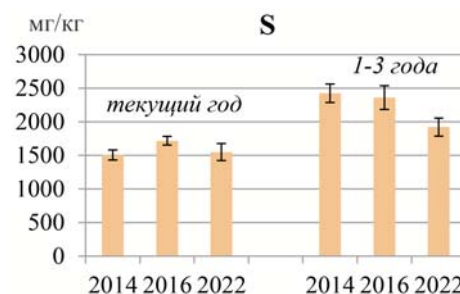


Рис. 4. Динамика содержания серы в хвое сосны скрученной по годам, мг/кг абс. сух. вещ-ва

Fig. 4. Dynamics of sulfur in pine needles of *Pinus contorta* by year, mg/kg abs. dry matter

В разные периоды обследования саженцы отличались по состоянию (табл. 1, рис. 5–8), что объяснялось в первую очередь воздушными выбросами сернистого газа. В начале июня 2005 г. в результате пересадки в другой регион, в условия сильного воздушного загрязнения и стресса, вся хвоя сосны имела бурый цвет и опадала. При оценке состояния (август 2005 г.) обнаружено, что у некоторых растений верхушечная почка осталась живой и пошла в рост новая хвоя. Большинство сосен засохли.

В 2008 г. было учтено 104 саженца, средняя высота живой части растений составила 0,3 метра, 13,5 % сосен имели хвою только текущего года, 3,8 % – усохшую ранее и затем сломанную верхушку. В первые четыре года после высадки погибло более 80 % саженцев и посадки характеризовались как погибшие (табл. 1, рис. 5).

В последующие годы состояние сосны скрученной продолжало ухудшаться (рис. 6–8). Загрязнение почвы тяжелыми металлами на участке ремедиации (рис. 2), значительное повреждение сернистым газом в результате разовых выбросов (летом 2014, 2016, 2018, 2020 гг.) вызвало усыхание растений. В 2017 г. насчитали только 27 живых саженцев сосны скрученной, из них у 26 % была сухая верхушка, хотя по индексу состояния сообщество относится уже не к погибшему, а к слабоповрежденному [Методические..., 1990]. В 2022 г. состояние сосен еще более ухудшилось – вероятно, сказался сильный выброс сернистого газа летом 2020 г., зафиксирован 71 % растений с засохшей верхушкой (табл. 1). При этом стали удлиняться расположенные ниже ветки (рис. 8), что, вероятно, приведет в будущем к смене усохшего верхушечного побега одним из боковых.

Таблица 1. Состояние сосны скрученной по годам

Table 1. State of *Pinus contorta* by year

Год Year	Количество живых саженцев Number of living seedlings	Средняя высота, м Average height, m	Индекс состояния State index	Сухая вершина Dry top, %	Возраст хвои Age of needles
2004	~ 600	до 1,0 м	-	0	4–5 лет 4–5 years
2005	-	-	-	-	1–2 года 1–2 years
2008	74	0,3 ± 0,02	4,98	4	текущий current
2014	-	-	-	-	1–3 года 1–3 years
2017	27	1,0 ± 0,14	2,26	26	67 % 1–2 года / 1–2 years 22 % до 3 лет / up to 3 years 11 % до 5 лет / up to 5 years
2022	21	1,2 ± 0,14	2,43	71	29 % 1–2 года / 1–2 years 71 % до 3 лет / up to 3 years

Примечание. «-» – не определяли.

Note. «-» – no date.



Рис. 5. Состояние саженцев сосны скрученной летом 2008 г.

Fig. 5. The state of *Pinus contorta* seedlings, summer 2008



Рис. 6. Саженьцы сосны скрученной летом 2016 г.
Fig. 6. Seedlings of *Pinus contorta*, summer 2016



Рис. 7. Саженьцы сосны скрученной летом 2017 г.
Fig. 7. Seedlings of *Pinus contorta*, summer 2017



Рис. 8. Саженьцы сосны скрученной осенью 2022 г.
Fig. 8. Seedlings of *Pinus contorta*, autumn 2022

Известно, что по длине хвои сосна скрученная превосходит сосну обыкновенную на 28 % ($p < 0,001$), т. е. в 1,2 раза [Плюснина и др., 2024], а надземная биомасса *Pinus contorta* var. *latifolia* достоверно ($p < 0,01$) и значительно (более чем в два раза) выше, чем у *Pinus sylvestris* L. [Jansons et al., 2013]. В Архангельской области средняя длина хвои у 7–20-летних саженцев сосны скрученной равнялась $50,2 \pm 1,1$ мм (Емецкий район) и $59,6 \pm 1,0$ мм (Холмогорский район) и превышала длину хвои сосны обыкновенной в 1,3 и 1,5 раза соответственно [Бирюков, 2007]; в Республике Коми этот показатель у 18-летних сеянцев – $61,3 \pm 0,5$ мм (1 год) и $58,0 \pm 0,6$ мм (2 года) [Плюснина и др., 2024]. На участке ремедиации средняя длина 1–3-летней хвои сосны скрученной в 2022 г. составила $68,4 \pm 0,5$ мм, максимальная длина хвои текущего года достигала 10 см (табл. 2), а длина хвои сосны обыкновенной в техногенном редколесье – 50,5 мм (табл. 3). Длина хвои саженцев сосны скрученной на участке ремедиации превышает длину хвои сосны обыкновенной, растущей в техногенном редколесье и в фоновых условиях [Сухарева, 2017], в 1,7–2 раза.

В ненарушенных лесных сообществах из минеральных элементов в хвое древесных

растений преобладают калий и кальций. Установлено, что концентрации элементов в хвое сосны обыкновенной закономерно изменяются при ее старении [Лукина, Никонов, 1998], концентрации подвижных элементов (азот, фосфор, калий и магний) с возрастом в хвое снижаются, а концентрации малоподвижных элементов (кальций, алюминий, железо и марганец) возрастают. Содержание основных элементов питания растений (К, Mn и P) в хвое текущего года сосны скрученной за период с 2014 по 2022 г. снижается, а кальция – увеличивается (до 3774 мг/кг абс. сух. веса). Данные элементы являются подвижными и способны реутилизироваться из хвои старших возрастов в более молодую хвою [Сухарева, 2017]. В этот же период в хвое 1–3 лет концентрации Ca, Mg, Fe и Mn достоверно выше ($p < 0,05$), чем в хвое текущего года, а калия и фосфора – ниже (табл. 4). Следует отметить, что концентрации таких элементов, как Ca, Mg, K и Fe, в хвое сосны скрученной превышают таковые в хвое сосны обыкновенной в условиях техногенного редколесья (табл. 5). Количественное соотношение элементов, в том числе кальция и калия, может меняться и зависит от возраста хвои и влияния атмосферного загрязнения [Сухарева, 2017].

Таблица 2. Длина хвои сосны скрученной на участке ремедиации, мм

Table 2. Length of needles of *Pinus contorta* on the area of remediation, mm

Дата отбора Sampling date	Текущий год* Current year*	Min–max	n	1–3 года* 1–3 years*	Min–max	n
01.08.2014	$53,92 \pm 0,33$	37–77	500	$59,33 \pm 0,52$	37–95	500
08.08.2018	$62,72 \pm 0,41$	37–100	803	$55,64 \pm 0,32$	35–85	865
16.08.2022	$53,86 \pm 0,45$	10–100	895	$68,42 \pm 0,45$	15–97	873

Примечание. *Здесь и далее в таблицах показаны среднее значение \pm стандартная ошибка.

Note. *Here and further, the tables show the average value \pm the standard error.

Таблица 3. Длина хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на фоновой территории и в техногенном редколесье, мм

Table 3. Length of pine needles (*Pinus sylvestris*) in the background area and man-made sparse forest, mm

Дата отбора Sampling date	Текущий год Current year	n	Min–max	1 год 1 year	n	Min–max	3 года 3 years	n	Min–max
Фон / Background									
15.08.2005	$31,63 \pm 0,09$	1000	22–40	$32,32 \pm 0,11$	672	25–40	$30,75 \pm 0,10$	999	22–45
15.08.2005	$38,14 \pm 4,52$	1000	26–50	$38,03 \pm 4,96$	1000	28–50	$35,07 \pm 4,07$	1000	25–46
15.08.2005	$30,82 \pm 4,66$	1000	20–50	$33,98 \pm 4,78$	1000	23–48	$34,51 \pm 5,30$	867	23–47
Техногенное сосновое редколесье Man-made pine sparse forest									
18.08.2005	$30,52 \pm 0,14$	1000	23–49	$38,10 \pm 0,23$	1000	23–55	$35,85 \pm 0,47$	142	27–48
18.08.2005	$31,37 \pm 0,11$	1000	23–43	$35,13 \pm 0,15$	1000	12–48	$32,76 \pm 0,12$	872	21–41
18.08.2005	$27,35 \pm 0,11$	1000	21–43	$34,11 \pm 0,12$	1000	23–46	$32,83 \pm 0,14$	785	22–42

Таблица 4. Содержание элементов в хвое сосны скрученной, мг/кг

Table 4. Concentrations of elements in the needles of *Pinus contorta*, mg/kg

Дата отбора Sampling date	Ca	Mg	K	Fe	Mn	P	n
Хвоя текущего года Current year's needles							
01.08.2014	2304,4 ± 109,3	1274,3 ± 39,5	7370,3 ± 191,3	32,3 ± 0,7	293,1 ± 7,5	1603,0 ± 29,2	5
16.08.2016	3170,2 ± 189,1	1217,2 ± 103,5	6793,7 ± 302,2	76,6 ± 3,5	246,8 ± 41,6	1503,3 ± 80,0	5
16.08.2022	3773,9 ± 879,3	1200,6 ± 125,0	6424,5 ± 547,9	59,0 ± 5,0	178,7 ± 50,6	1446,4 ± 68,9	5
Хвоя в возрасте 1–3 года Needles aged 1–3 years							
01.08.2014	5516,6 ± 135,3	1715,7 ± 19,2	4476,8 ± 52,5	60,6 ± 1,2	498,6 ± 7,4	880,7 ± 10,5	5
16.08.2016	5924,6 ± 273,2	1608,6 ± 201,1	4998,1 ± 279,3	181,0 ± 6,9	255,7 ± 41,4	806,7 ± 69,4	5
16.08.2022	4818,2 ± 707,2	1853,3 ± 242,2	5082,6 ± 206,0	140,4 ± 9,0	318,6 ± 91,7	897,1 ± 60,0	5

Таблица 5. Содержание элементов в хвое сосны обыкновенной, мг/кг

Table 5. Concentrations of elements in the needles of *Pinus sylvestris*, mg/kg

Дата отбора Sampling date	Возраст хвои, лет Age of needles, yrs	Ni	Cu	Ca	Mg	K	Fe	Mn	P	n
Фон / Background										
26.08.2019	Хвоя текущего года Current year's needles	2,0 ± 0,4	4,0 ± 0,2	1666,2 ± 104,2	1013,4 ± 65,8	6499,1 ± 245,3	30,1 ± 1,9	408,8 ± 69,7	1753,6 ± 66,2	5
26.08.2019	Хвоя в возрасте 1 года Needles aged 1 year	0,6 ± 0,1	2,7 ± 0,1	3254,2 ± 198,3	916,7 ± 42,8	4186,8 ± 186,3	44,2 ± 3,4	823,2 ± 99,4	1192,2 ± 62,7	5
Техногенное редколесье Man-made sparse forest										
23.08.2019	Хвоя текущего года Current year's needles	55,2 ± 4,6	16,4 ± 1,7	2051,3 ± 160,0	989,9 ± 50,7	5936,6 ± 571,9	41,1 ± 3,1	179,8 ± 9,0	1532,1 ± 54,9	5
23.08.2019	Хвоя в возрасте 1 года Needles aged 1 year	86,8 ± 2,8	24,3 ± 1,4	2979,8 ± 356,6	929,1 ± 28,2	3381,1 ± 182,6	70,5 ± 2,1	265,4 ± 16,5	1053,4 ± 59,9	5

В 2004 г. сотрудниками ООО НПО «Алкахест» саженцы сосны скрученной (предположительно высотой 1–1,5 м) также были посажены в г. Мончегорске вдоль ограды Свято-Вознесенского кафедрального собора (5,5 км восточнее комбината «Североникель»). В настоящее время 8 экз. этих саженцев в хорошем состоянии, имеют высоту от 5 до 8 м, средний диаметр ствола $14,4 \pm 1,1$ см, минимальный – 10,4 см, максимальный – 20,4 см (рис. 9). Имеются шишки разных лет, все особи активно цвели в 2025 г. Можем предположить, что на поражение сернистым газом сосны скрученной влияет направление ветра в зоне расположения комбината «Североникель».

Заключение

Результаты применения саженцев сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia*) при ремедиации растительности на техногенной пустоши в условиях постоянно действующего



Рис. 9. Саженцы сосны скрученной на территории собора, август 2025 г.

Fig. 9. Seedlings of *Pinus contorta* on the territory of the cathedral, August 2025

комбината «Североникель» (АО «Кольская ГМК») вблизи г. Мончегорска оказались неудовлетворительными.

Состояние сосны скрученной в значительной степени зависит от концентрации выбросов в атмосферу, особенно сернистого газа, и направления ветра. За период наблюдений погибло более 90 % саженцев, оставшиеся сосны имеют среднюю высоту $1,2 \pm 0,1$ м, возраст хвои до трех лет, среднюю длину хвои текущего года $53,9 \pm 0,5$ мм, 71 % сосен имеют сухую вершину.

В Мурманской области, на территории, не подверженной влиянию промышленных выбросов, и при промышленном загрязнении выбросами комбината «Североникель» длина хвои саженцев сосны скрученной превышает длину хвои сосны обыкновенной, что согласуется с данными других исследователей по Архангельской области и Республике Коми.

Концентрации основных загрязняющих веществ (Ni, Cu и S) в хвое сосны скрученной в последние годы остаются высокими, особенно в хвое 1–3 лет (в 2022 г. – 156, 23 и 1923 мг/кг соответственно). Установлено, что за период с 2014 по 2022 г. содержание основных элементов питания растений (K, Mn и P) в хвое текущего года сосны скрученной снизилось, а кальция – возросло. В хвое 1–3 лет концентрации Ca, Mg, Fe и Mn достоверно выше ($p < 0,05$), чем в хвое текущего года.

Посадка хвойных пород, в том числе интродуцентов, в зоне влияния выбросов комбината «Североникель» не рекомендуется. Состояние саженцев сосны скрученной вне зоны значительного воздушного загрязнения выбросами комбината «Североникель» (территория кафедрального собора) показывает, что сосна скрученная может быть использована в регионе для озеленения городов и населенных пунктов.

Авторы выражают признательность лаборанту С. В. Жуковой за подготовку проб и сотрудникам ЦКП ИППЭС КНЦ РАН за выполнение химико-аналитических исследований растительных и почвенных образцов.

Литература

Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

Алексеев В. М., Жигунов А. В., Бондаренко А. С., Бурцев Д. С. Интродукция сосны скрученной в условиях Ленинградской области // Известия вузов. Лесной журнал. 2014. № 3. С. 24–33.

Бабич Н. А., Андропова М. М. Сосна скрученная – перспективный интродуцент для озеленения малых

северных городов // Известия вузов. Лесной журнал. 2014. № 6. С. 155–160.

Бирюков С. Н. Эколого-биологическая характеристика сосны скрученной и сосны обыкновенной в северной подзоне европейской тайги (Архангельская область): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар, 2007. 21 с.

Влияние промышленного атмосферного загрязнения на сосновые леса Кольского полуострова / Под ред. Б. Н. Норина, В. Т. Ярмишко. Л.: Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова АН СССР, 1990. 195 с.

Гутый Л. Н., Федорков А. Л. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Сыктывкарском лесничестве Республики Коми // Известия вузов. Лесной журнал. 2016. № 1. С. 48–54. doi: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.48

Демидова Н. А., Дуркина Т. М., Гоголева Л. Г., Демиденко С. А., Быков Ю. С., Парамонов А. А. Рост и развитие сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) в условиях северной тайги // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 45–59. doi: 10.211178/2079-6080.2016.2.42

Демидова Н. А., Дуркина Т. М., Гоголева Л. Г., Быков Ю. С., Парамонов А. А. Результаты 35-летнего испытания сосны скрученной на Европейском Севере России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. № 225. С. 90–105. doi: 10.21266/2079-4304.2018.225.90-105

Исаева Л. Г., Лукина Н. В., Горбачева Т. Т., Белова Е. А. Ремедиация нарушенных территорий в зоне влияния медно-никелевого производства // Цветные металлы. 2011. № 11. С. 66–70.

Кайтера Ю. А., Федорков А. Л., Ялканен Р. Е. Распространение побегового рака по градиенту загрязнения среды в Российской и Финской Лапландии // Известия вузов. Лесной журнал. 1996. № 3. С. 26–31.

Кайтера Ю. А., Федорков А. Л., Ялканен Р. Е. Чувствительность сосны обыкновенной к побеговому раку в контрастных условиях загрязнения среды // Микология и фитопатология. 2001. Т. 35, вып. 2. С. 48–52.

Корчагов С. А., Грибов С. Е., Хамитов Р. С. Опыт выращивания сосны скрученной (*Pinus contorta*) в Вологодской области // Лесной вестник. 2020. Т. 24, № 3. С. 60–65. doi: 10.18698/2542-1468-2020-3-60-65

Крутов В. И. Грибные болезни хвойных пород в искусственных ценозах таежной зоны Европейского Севера СССР. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1989. 208 с.

Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 316 с.

Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах / Отв. ред. Л. О. Карпачевский. М.: Наука, 2005. 245 с.

Маркова И. А., Жигунов А. В. Лесокультурные испытания перспективных пород-интродуцентов на Северо-Западе России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 1999. Вып. 165. С. 20–28.

Методические рекомендации по оценке существующего и прогнозируемого состояния лесных насаждений в зоне влияния промышленных предприятий Мурманской области / Государственный комитет СССР по лесу; Архангельский институт леса и лесохимии. Архангельск, 1990. 17 с.

Плюснина С. Н., Федорков А. Л., Гуляев Р. Г. Структура хвой сосны скрученной *Pinus contorta* Dougl. и сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. в экспериментальных культурах // Лесной вестник. 2024. Т. 28, № 1. С. 46–55. doi: 10.18698/2542-1468-2024-1-46-55

Проблемы экологии растительных сообществ / Отв. ред. В. Т. Ярмишко. СПб.: ВВМ, 2005. 450 с.

Раевский Б. В. Использование быстрорастущих хвойных интродуцентов в лесовосстановлении на Европейском Севере России (на примере сосны скрученной широкохвойной) // Северные территории России: проблемы и перспективы развития: Мат-лы и докл. Всерос. конф. с междунар. участием (г. Архангельск, 23–26 июня 2008). Архангельск, 2008. С. 1125–1129.

Раевский Б. В. Некоторые результаты интродукционных испытаний сосны скрученной в южной Карелии // Ученые записки ПетрГУ. Сер. Естественные и технические науки. 2009. № 7(101). С. 51–59.

Раевский Б. В. Ход роста смешанных культур сосны скрученной и сосны обыкновенной в южной Карелии // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 1. С. 31–38.

Раевский Б. В., Мордась А. А. Ход роста сосны скрученной в подзоне средней тайги // Известия вузов. Лесной журнал. 2005. № 1-2. С. 22–33.

Сает Ю. Е., Раевич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Л. Н., Трефилова Н. Я., Ачкасова А. И., Саркисян С. Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

Стафеев Б. Л. Североамериканская сосна скрученная – перспективная порода для интродукционного испытания в Архангельской области // Вопросы интродукции хозяйственно ценных древесных пород на Европейском Севере. Архангельск, 1989. С. 35–43.

Сухарева Т. А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. Вып. 14. С. 438–441.

Федорков А. Л., Туркина А. А. Экспериментальные культуры сосны скрученной в Республике Коми // Лесоведение. 2010. № 1. С. 70–74.

Цветков В. Ф. К проблеме восстановления леса в зоне влияния промышленных выбросов на Кольском полуострове // Проблемы исследования и охраны природы в регионе Белого моря. Мурманск: Кн. изд-во, 1987. С. 148–156.

Цветков В. Ф., Цветков И. В. Промышленное загрязнение окружающей среды и лес. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 312 с.

Elfving B., Ericsson T., Rosvallb O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // For. Ecol. Manag. 2001. Vol. 141, iss. 1. P. 15–29. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00485-0

Hansson P. *Gremmeniella abietina* in Northern Sweden. Silvicultural aspects of disease development in the introduced *Pinus contorta* and in *Pinus sylvestris*: Doctorial Thesis. SLU, Umea, 1996. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Silvestria 10: 40 p. + papers I–V.

Jansons A., Sisenis L., Neimane U., Rieksts-Riekstins Ju. Biomass production of young lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) stands in Latvia // Forest. 2013. Vol. 6. P. 10–14. doi: 10.3832/for0637-006

Karlman M., Hansson P., Witzell J. Scleroderris canker on lodgepole pine introduced in Northern Sweden // Can. J. For. Res. 1994. No. 24. P. 1948–1959. doi: 10.1139/x94-250

Stephan B. R., Schulze I. Scleroderris canker disease of conifers. Bibliography about the Scleroderris canker disease and its pathogen during the past 100 years (1883–1986) / Federal Research Centre of Forest Genetics and Forest Products. Institute of Forest Genetics and Forest Breeding, Grosshansdorf, Germany. IUFRO Working Party S 2.06.02. University of Agricultural Sciences, Umea, 1987. P. 335–349.

Winterhalder K. Environmental degradation and rehabilitation of the landscape around Sudbury, a major mining and smelting area // Environ. Rev. 1996. Vol. 4. P. 185–224. doi: 10.1139/a96-011

Witzell J. Risks associated with the introduction of *Pinus contorta* in northern Sweden with respect to pathogens // For. Ecol. Manag. 2001. Vol. 141(1). P. 97–105. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00492-8

Witzell J., Karlman M. Importance of site type and tree species on disease incidence of *Gremmeniella abietina* in areas with a harsh climate in Northern Sweden // Scand. J. For. Res. 2000. Vol. 15(2). P. 202–209. doi: 10.1080/028275800750015019

References

Alekseev V. A. Diagnostics of the vital condition of trees and stands. *Lesovedenie = Forest Science*. 1989;4:51–57. (In Russ.)

Alekseev V. M., Zhigunov A. V., Bondarenko A. S., Burtsev D. S. Introduction of *Pinus contorta* in the Leningrad Region. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 2014;3: 24–33. (In Russ.)

Babich N. A., Andronova M. M. Lodgepole pine – a perspective introduced species for greening of northern smaller cities. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 2014;6:155–160. (In Russ.)

Biryukov S. N. Ecological and biological description of lodgepole pine and Scots pine in the northern subzone of the European taiga (Arkhangelsk Region): Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Syktyvkar; 2007. 21 p. (In Russ.)

Demidova N. A., Durkina T. M., Gogoleva L. G., Bykov Y. S., Paramonov A. A. Results of a 35-year trial of lodgepole pine in the European north of Russia. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii = Proceedings of St. Petersburg Forestry Engineering Academy*. 2018;225:90–105. (In Russ.). doi: 10.21266/2079-4304.2018.225.90-105

Demidova N. A., Durkina T. M., Gogoleva L. G., Demidenko S. A., Bykov Yu. S., Paramonov A. A. Growth and development of a lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) in a northern boreal forest. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva = Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute*. 2016; 2:45–59. (In Russ.). doi: 10.21178/2079-6080.2016.2.42

Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review. *For. Ecol. Manag.* 2001;141(1):15–29. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00485-0

Fedorkov A. L., Turkina A. A. Experimental cultures of lodgepole pine in the Komi Republic. *Lesovedenie = Forest Science*. 2010;1:70–74. (In Russ.)

Gutii L. N., Fedorkov A. L. Experimental plantations of lodgepole pine in the Syktyvkar forestry in the Komi Republic. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 2016;1:48–54. (In Russ.). doi: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.48

Hansson P. *Gremmeniella abietina* in Northern Sweden. Silvicultural aspects of disease development in the introduced *Pinus contorta* and in *Pinus sylvestris*: Doctoral Thesis. Umea; 1996. 40 p.

Isaeva L. G., Lukina N. V., Gorbacheva T. T., Belova E. A. Remediation of disturbed territories in the zone of influence of copper-nickel production. *Tsvetnye metally = Non-Ferrous Metals*. 2011;11:66–70. (In Russ.)

Jansons A., Sisenis L., Neimane U., Rieksts-Riekstins Ju. Biomass production of young lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia*) stands in Latvia. *Forest*. 2013;6:10–14. doi: 10.3832/for0637-006

Kaitera Yu. A., Fedorkov A. L., Jalkanen R. E. Sensitivity of Scots pine shoots to infection by *Gremmeniella abietina* var. *abietina* in contrasting conditions of environmental pollution. *Mikologiya i fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. 2001;35(2):48–52. (In Russ.)

Kaitera Yu. A., Fedorkov A. L., Jalkanen R. E. The spread of shoot cancer along the gradient of environmental pollution in Russian and Finnish Lapland. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 1996;3:26–31. (In Russ.)

Karlman M., Hansson P., Witzell J. Scleroderris canker on lodgepole pine introduced in Northern Sweden. *Can. J. For. Res.* 1994;24:1948–1959. doi: 10.1139/x94-250

Korchagov S. A., Gribov S. E., Khamitov R. S. The experience of growing lodgepole pine (*Pinus contorta*) in the Vologda Region. *Lesnoi vestnik = Forestry Bulletin*. 2020;24(3):60–65. (In Russ.). doi: 10.18698/2542-1468-2020-3-60-65

Krutov V. I. Fungal diseases of coniferous species in artificial cenoses of the taiga zone of the European north of the USSR. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1989. 208 p. (In Russ.)

Lukina N. V., Nikonov V. V. Nutrient status of north taiga forests: natural regularities and pollution-induced changes. Apatity: KSC RAS; 1998. 316 p. (In Russ.)

Lukina N. V., Sukhareva T. A., Isaeva L. G. Pollution-induced digressions and rehabilitation successions

in Northern taiga forests. Moscow: Nauka; 2005. 245 p. (In Russ.)

Markova I. A., Zhigunov A. V. Forest culture tests of perspective foreign tree species in the North-West of Russia. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii = Proceedings of St. Petersburg Forestry Engineering Academy*. 1999;165:20–28. (In Russ.)

Methodological recommendations for assessing the existing and projected state of forest plantations in the zone of influence of industrial enterprises of the Murmansk Region. USSR State Forestry Committee; Arkhangelsk Institute of Forestry and Forest Chemistry. Arkhangelsk; 1990. 17 p. (In Russ.)

Norin B. N., Yarmishko V. T. (eds.). The impact of industrial atmospheric pollution on the pine forests of the Kola Peninsula. Leningrad: BIN AN SSSR; 1990. 195 p. (In Russ.)

Plyusnina S. N., Fedorkov A. L., Gulyaev R. G. Needle structure of *Pinus contorta* Dougl. and *Pinus sylvestris* L. in experimental cultures. *Lesnoi vestnik = Forestry Bulletin*. 2024;28(1):46–55. (In Russ.). doi: 10.18698/2542-1468-2024-1-46-55

Raevsky B. V. Growth and development of lodgepole pine and Scots pine in mixed plantings in south Karelia. *Izvestiya Komi NTS URO RAN = Proceedings of the Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2010;1:31–38. (In Russ.)

Raevsky B. V. Some results of introduction tests of lodgepole pine in south Karelia. *Uchenye zapiski PetRGU. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Technical Sciences*. 2009;7(101):51–59. (In Russ.)

Raevsky B. V. The use of fast-growing coniferous introducers in reforestation in the European North of Russia (on the example of lodgepole pine). *Severnye territorii Rossii: problemy i perspektivy razvitiya: Materialy i doklady Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Arkhangel'sk, 23–26 iyunya 2008) = Northern territories of Russia: problems and prospects of development: Proceedings of the All-Russian conf. with int. part. (Arkhangel'sk, June 23–26, 2008)*. Arkhangelsk; 2008. P. 1125–1129. (In Russ.)

Raevsky B. V., Mordas A. A. Growth Progress of Lodgepole Pine Plantation in the Middle Taiga Subzone. *Izvestiya vuzov. Lesnoi zhurnal = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 2005; 1-2:22–33.

Saet Yu. E., Raevich B. A., Yanin E. P., Smirnova R. S., Basharkevich I. L., Onishchenko T. L., Pavlova L. N., Trefilova N. Ya., Achkasova A. I., Sarkisyan S. Sh. Geochemistry of the environment. Moscow: Nedra; 1990. 335 p. (In Russ.)

Stafeev B. L. North American lodgepole pine is a perspective species for introduction testing in the Arkhangelsk Region. *Voprosy introduksii khozyaistvenno tsennykh drevesnykh porod na Evropeiskom Severe = Issues of introduction of economically valuable tree species in the European North*. Arkhangelsk; 1989. P. 35–43. (In Russ.)

Stephan B. R., Schulze I. Scleroderris canker disease of conifers. Bibliography about the Scleroderris canker disease and its pathogen during the past

100 years (1883–1986). *Federal Research Centre of Forest Genetics and Forest Products. Institute of Forest Genetics and Forest Breeding*, Grosshansdorf, Germany. IUFRO Working Party S 2.06.02. University of Agricultural Sciences, Umea; 1987. P. 335–349.

Sukhareva T. A. Features of the accumulation of chemical elements by trees plants of Northern Taiga forests in background and technogenically disturbed territories. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTS RAN = Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute of the Kola Scientific Center of the RAS.* 2017;14:438–441. (In Russ.)

Tsvetkov V. F. On the problem of forest restoration in the zone of influence of industrial emissions on the Kola Peninsula. *Problemy issledovaniya i okhrany prirody v regione Belogo morya = Problems of research and nature conservation in the White Sea region.* Murmansk; 1987. P. 148–156. (In Russ.)

Tsvetkov V. F., Tsvetkov I. V. Industrial environmental pollution and forests. Arkhangelsk: SAFU; 2012. 312 p. (In Russ.)

Winterhalder K. Environmental degradation and rehabilitation of the landscape around Sudbury, a major mining and smelting area. *Environ. Rev.* 1996;4:185–224. doi: 10.1139/a96-011

Witzell J. Risks associated with the introduction of *Pinus contorta* in northern Sweden with respect to pathogens. *For. Ecol. Manag.* 2001;141(1):97–105. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00492-8

Witzell J., Karlman M. Importance of site type and tree species on disease incidence of *Gremmeniella abietina* in areas with a harsh climate in Northern Sweden. *Scand. J. For. Res.* 2000;15(2):202–209. doi: 10.1080/028275800750015019

Yarmishko V. T. (ed.). Problems of ecology of plant communities. St. Petersburg: VVM; 2005. 450 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 11.04.2025; принята к публикации / accepted: 17.11.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Исаева Людмила Георгиевна

канд. с.-х. наук, доцент, ведущий научный сотрудник
лаборатории наземных экосистем

e-mail: l.isaeva@ksc.ru

Рябов Николай Сергеевич

инженер 1 категории, аспирант Лаборатории наземных
экосистем

e-mail: n.ryabov@ksc.ru

CONTRIBUTORS:

Isaeva, Ludmila

Cand. Sci. (Agr.), Associate Professor, Leading Researcher

Ryabov, Nikolay

Engineer, Doctoral Student

УДК 574.583

СОСТОЯНИЕ ЗООПЛАНКТОНА ПЕЛАГИАЛИ КОНДОПОЖСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Д. С. Коновалов*, М. Т. Сярки

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*konovalov.daniil1998@gmail.com

На протяжении многолетнего периода (с 1929 г.) акватория одного из крупных заливов Онежского озера – Кондопожской губы – испытывает значительную антропогенную нагрузку, вызванную деятельностью Кондопожского ЦБК. В истории функционирования ЦБК выделяется несколько этапов, характеризовавшихся разным объемом и составом сточных вод. В 1980-х годах начался процесс антропогенного эвтрофирования залива в связи с поступлением биогенных элементов, вызванным введением в эксплуатацию станции биологической очистки сточных вод. В последние десятилетия появился новый фактор антропогенной биогенной нагрузки – форелевые хозяйства. Ряд исследований отмечают также потепление климата как условие, влияющее на планктонную систему Онежского озера. Анализ состояния зоопланктона Кондопожской губы выполнен на основании сетных ловов 2019–2021 гг. Пробы отбирали в период максимального развития зоопланктона (конец июля – начало августа) на трех станциях: в вершинной части залива, в центральной части и в заливе Большое Онего (в качестве фоновой). Показано, что в планктонных сообществах Кондопожской губы не произошло серьезных изменений по сравнению с их состоянием в конце XX века, однако отмечаются признаки начальных этапов нарушения стабильности планктонной системы. К ним относятся: новый многолетний максимум в обилии зоопланктона вершинной части залива; высокое обилие реликтового рачка *Limnocalanus macrurus* (Sars, 1863) в центральной части и в заливе Большое Онего; изменения в соотношении близких видов рода *Bosmina* (*Eubosmina*) Seligo, 1900 в доминантном комплексе.

Ключевые слова: антропогенное эвтрофирование; межгодовая изменчивость; сточные воды ЦБК; форелевые хозяйства; *Limnocalanus macrurus*

Для цитирования: Коновалов Д. С., Сярки М. Т. Состояние зоопланктона пелагиали Кондопожской губы Онежского озера в условиях антропогенной нагрузки и климатических изменений // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 90–105. doi: 10.17076/eco2096

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания КарНЦ РАН (№ FMEN-2026-0011).

D. S. Konovalov*, M. T. Syarki. THE STATE OF ZOOPLANKTON IN THE PELAGIC ZONE OF KONDOPOGA BAY, LAKE ONEGO, UNDER HUMAN IMPACT AND CLIMATE CHANGE

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *konovalov.daniil1998@gmail.com

Kondopoga Bay is one of the largest bays of Lake Onego. For many years (since 1929), the bay has been experiencing significant anthropogenic stress due to operations of the Kondopoga Pulp and Paper Mill (PPM). The PPM had gone through several stages characterized by different volumes and compositions of wastewater. In the 1980s, the influx of nutrients upon the commissioning of a biological wastewater treatment plant triggered anthropogenic eutrophication of the bay. In recent decades, there appeared yet another source of nutrient pollution – trout farms. A number of studies highlight climate warming as a new factor affecting the plankton system of Lake Onego. The dataset for analyzing the state of zooplankton in Kondopoga Bay was formed by netting performed in 2019–2021. Samples were collected during zooplankton development peaks (late July – early August) at three stations: in the bay top, in its central part, and in Bolshoe Onego Bay (for reference). The studies show that no major changes have occurred in the plankton communities of Kondopoga Bay compared to their state late in the 20th century. However, there are signs of early-stage destabilization of the bay's plankton system, such as a new multi-annual maximum in zooplankton abundance in the Kondopoga Bay top, high abundance of the relict crustacean *Limnocalanus macrurus* (Sars, 1863) in the central part of Kondopoga Bay and in Bolshoe Onego Bay, changes in the ratio of closely related species of the genus *Bosmina* (*Eubosmina*) Seligo, 1900 among the dominants.

Keywords: anthropogenic eutrophication; interannual variability; wastewater from pulp and paper mill; trout farms; *Limnocalanus macrurus*

For citation: Konovalov D. S., Syarki M. T. The state of zooplankton in the pelagic zone of Kondopoga Bay, Lake Onego, under human impact and climate change. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 90–105. doi: 10.17076/eco2096

Funding. The study was carried out under state assignment to KarRC RAS (#FMEN-2026-0011).

Введение

Онежское озеро – одно из великих озер Европы и имеет большое природное и хозяйственное значение. Эффективное распоряжение водными ресурсами Онежского озера – проблема общегосударственного масштаба. Согласно Государственному докладу о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 году [2021], объем использованной воды Онежского озера составил 105,6 млн м³. На территории водосбора в 2022 году зарегистрировано 125 официальных источников водопользования. Объем сброшенных в Онежское озеро сточных вод, содержащих загрязняющие вещества, в 2022 году составил 162,2 млн м³. Основные источники водопользования расположены на территории крупных заливов – Петрозаводской губы, Кондопожской губы и Повенецкого залива.

Среди них залив Кондопожская губа традиционно выделяется как объект мониторинговых исследований в связи со значительной

антропогенной нагрузкой [Калинкина и др., 2021; Зобкова, 2024]. В вершинной части залива расположен целлюлозно-бумажный комбинат, сточные воды которого проходят биологическую очистку и сбрасываются в залив; а в центральной части – 11 форелевых хозяйств с общей мощностью в 3870 т/год [Смирнова и др., 2024]. Кроме того, по сравнению с другими крупными заливами в Кондопожской губе водообмен с открытым плесом более ограничен [Галахина, Зобков, 2022], а период условного водообмена составляет 1,03 года [Лозовик и др., 2019].

Помимо антропогенной нагрузки в последнее время актуальной становится проблема изменения климата [Филатов и др., 2012а, б; Смирнова, 2022; Назарова и др., 2024]. Одним из физических последствий климатических изменений является нарушение гидротермического режима озер: более ранний сход льда [Филатов и др., 2024], увеличение продолжительности периода летней стратификации

и повышение температуры поверхности воды в летний период [Здоровеннова и др., 2017].

Зоопланктон, как следующий за фитопланктоном элемент озерных трофических сетей, также реагирует на внешние факторы. При увеличении биогенной нагрузки наблюдается более интенсивное развитие зоопланктона [Тимакова и др., 2014; Сярки, Фомина, 2019б; Фомина и др., 2019]. Климатические изменения влияют на гидротермический режим и синхронизированные с ним фенологические фазы развития зоопланктона: их сроки наступления и продолжительность [Фомина, Сярки, 2018; Сярки, Фомина, 2019а].

Совокупность особенностей морфометрии Кондопожской губы, сниженного водообмена с основным плесом, интенсивной хозяйственной деятельности на акватории и климатических изменений, а также стратегическое значение Онежского озера обостряют необходимость постоянных мониторинговых наблюдений за экологическим состоянием этого водного объекта. Целью настоящей работы является оценка состояния зоопланктона Кондопожской губы Онежского озера в контексте многолетних изменений.

Материалы и методы

Кондопожская губа – крупный узкий залив Онежского озера с площадью зеркала 223 км² и средней глубиной 21 м [Крупнейшие..., 2015]. Акватория залива по трофическим условиям (уровню развития фито- и бактериопланктона), глубинам, температурному режиму и

характеристикам водообмена условно разделяется на три части: вершинную, центральную и открытую. На акватории Кондопожской губы расположены стандартные мониторинговые станции (рис. 1). Функционирование сообществ зоопланктона глубоководных станций залива (К6, К7) традиционно сравнивается с заливом Большое Онего (ст. В1).

Основной источник формирования химического состава воды в заливе – речной сток, который обеспечивается третьим по величине притоком Онежского озера – р. Суна со среднегодовым расходом воды 2,3 км³/год [Балаганский и др., 2015]. Среди антропогенных источников формирования химического состава воды залива выделяется расположенный здесь целлюлозно-бумажный комбинат, сточные воды которого сбрасываются в вершинной части залива [Сабылина, 2015; Galakhina et al., 2022]. С начала 1990-х годов по настоящее время фосфорная нагрузка сточных вод значительно сократилась – с 109 до 12 т/год [Литвинова и др., 2021]. С 2000-х годов по настоящее время в прибрежной зоне центральной части залива расположено 11 форелевых хозяйств с общей мощностью ~ 3900 т/год, что послужило увеличению антропогенной нагрузки [Теканова и др., 2019; Galakhina et al., 2022]. Залив Большое Онего характеризуется большими глубинами (~100 м), свободным водообменом с центральным плесом Онежского озера, естественным олиготрофным статусом, высоким качеством воды и низким ($P_{\text{общ}} 12$ мкг/л) содержанием биогенов [Сабылина и др., 2010].

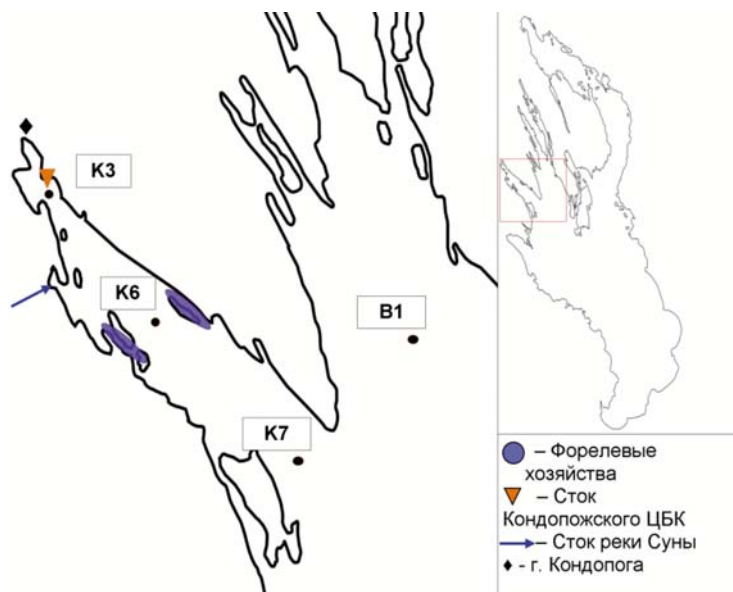


Рис. 1. Мониторинговые станции Кондопожской губы

Fig. 1. Monitoring stations in Kondopoga Bay

Гидрологический режим исследуемых акваторий является типичным для димиктических водоемов, в годовом цикле выделяются два перемешивания (весеннее и осеннее), прямая летняя температурная стратификация и обратная зимняя, а также два раза в год наблюдается явление термического бара, разделяющее акваторию на две области – стратифицированную и с изотермией [Онежское..., 2010]. Температурные условия поверхностного слоя воды в пик вегетационного периода (конец июля – начало августа) однородны по всей акватории озера. По среднемноголетним данным [Онежское..., 2010], поверхность воды прогревается к этому времени до 17 °С, отличия проявляются на глубинах более 10 м.

На протяжении многолетнего периода исследований послонные пробы зоопланктона отбирали сетью Джеди с установленным замыкателем (диаметр 19 или 25 см, сторона ячеи 100 мкм). Камеральную обработку проб выполняли по стандартной методике с учетом индивидуальных весов массовых видов Онежского озера [Куликова, Сярки, 1994; Методы..., 2024]. Идентификация зоопланктона проводилась по общепринятым определителям [Определитель..., 2010; Коровчинский и др., 2021]. Накопленные данные организованы в зарегистрированные базы данных [Сярки, Куликова, 2012; Сярки и др., 2015].

Состояние сообщества охарактеризовано на основании данных о летнем зоопланктоне (конец июля – начало августа) трех стандартных станций (табл. 1).

Проанализированы показатели обилия в м³ по слоям и под м², а также соотношение таксономических групп зоопланктона и видовой состав. За нижнюю границу доминирования принимали обилие вида выше 10 % (субдоминанты – от 5 до 10 %) от общей численности и биомассы. Видовое разнообразие оценивалось по индексу Шеннона – Уивера по станции в столбе воды, который рассчитывался по формуле:

$$H' = -\sum p_i * \text{Log}_2 p_i,$$

где H' – значение индекса, p_i – доля особей i-вида.

Несмотря на отмеченную выравненность температурных условий по всей акватории озера в конце июля – начале августа, в термическом режиме существуют также и явления меньших масштабов – синоптическая изменчивость, внутренние волны и ветровое перемешивание, влияющие на вертикальное распределение температуры воды [Здоровеннов, Зимон, 2006]. Вертикальные профили температуры исследуемых станций (рис. 2) получены с помощью мультипараметрического гидрологического зонда CTD-90M [Калинкина и др., 2023].

В период исследования наблюдали выраженную межгодовую и пространственную неоднородность вертикального распределения температуры воды. Температура поверхности воды в районе исследования в целом была ниже среднемноголетних значений [Онежское..., 2010], за исключением вершинной части залива в 2021 г., когда температура соответствовала среднемноголетней. Примечательно, что в августе 2020 г. температура поверхности воды в центральной части залива была выше, чем в вершинной.

Результаты и обсуждение

За летний период 2019–2021 гг. в зоопланктоне исследуемых районов выявлено 59 таксонов рангом рода и ниже, из них веслоногих – 15, кладоцер – 23 и коловраток – 21. Горизонтальное распределение количества видов было неоднородным на исследуемых станциях. Наибольшее число видов (32) наблюдали в центральной части залива, наименьшее – в заливе Большое Онего (23). В вершинной части Кондопожской губы в 2021 г. отмечена чужеродная коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet).

Таблица 1. Материалы для описания состояния зоопланктона

Table 1. Materials for describing the state of zooplankton

Район (Станция) Area (Station)	Глубина, м (Depth, m)	Даты отбора проб (Sampling dates)	Число проб (Number of samples)
Вершинная часть Кондопожской губы (ст. К3) The top part of Kondopoga Bay (st. K3)	15	10.08.2019	4
	16	13.08.2020	3
	15	04.08.2021	2
Центральная часть Кондопожской губы (ст. К6) The central part of Kondopoga Bay (st. K6)	77	10.08.2019	6
	78	14.08.2020	5
	82	04.08.2021	5
Залив Большое Онего (ст. В1) Bolshoe Onego Bay (st. B1)	77	09.08.2019	6

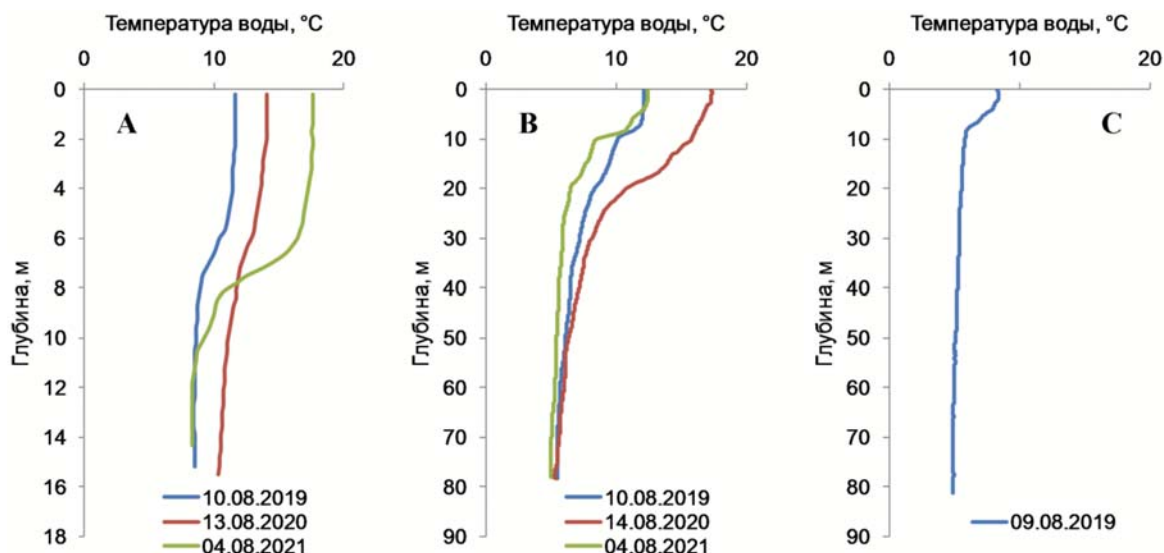


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воды исследуемых станций за период исследования. Здесь и на рис. 3, 4: А – верхинная часть Кондопожской губы; В – центральная часть Кондопожской губы; С – залив Большое Онего

Fig. 2. Vertical profiles of the water temperature of the studied stations during the study period.

Here and in Fig. 3, 4: А – the top part of Kondopoga Bay; В – the central part of Kondopoga Bay; С – Bolshoe Onego Bay

На протяжении всего периода исследований на всей акватории отмечались рачки *Eudiaptomus gracilis* (Sars), *Heterocope appendiculata* (Sars), *Eurytemora lacustris* (Poppe), *Limnocalanus macrurus* (Sars), *Mesocyclops leuckarti* (Claus), *Alonella exigua* (Lilljeborg), *Bosmina*

(*Eubosmina*) *coregoni* cf. *longispina* (Leydig), *Chydorus sphaericus* (Müller), *Daphnia* (*Daphnia*) *cristata* (Sars) и коловратки *Kellicottia longispina* (Kellicott), *Keratella cochlearis* (Gosse), *Conochilus* sp. (Ehrenberg). Видовой состав указан в табл. 2.

Таблица 2. Видовой состав планктонных сообществ исследуемого района

Table 2. Species composition of planktonic communities of the studied area

№ п/п Number	Вид Species	К3			К6			B1
		2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019
1	<i>Limnocalanus macrurus</i> (Sars, 1863)	+	+	+	+	+	+	+
2	<i>Eurytemora lacustris</i> (Poppe, 1887)	+	+	+	+	+	+	+
3	<i>Heterocope appendiculata</i> (Sars, 1863)	+	+	+	+	+	+	+
4	<i>Eudiaptomus gracilis</i> (Sars, 1863)	+	+	+	+	+	+	+
5	<i>Macrocyclus albidus</i> (Jurine, 1820)	-	-	+	-	-	-	-
6	<i>Paracyclus fimbriatus</i> (Fischer, 1853)	+	-	-	-	-	-	-
7	<i>Cyclops</i> sp. (Müller, 1776)	-	-	-	+	+	+	+
8	<i>C. lacustris</i> (Sars, 1863)	-	-	-	-	+	-	-
9	<i>C. strenuus</i> (Fischer, 1851))	-	-	+	-	-	-	-
10	<i>C. abyssorum</i> (Sars, 1863)	-	+	-	+	+	+	+
11	<i>Megacyclus viridis</i> (Jurine, 1820)	+	-	-	-	-	-	-
12	<i>Acanthocyclops</i> sp. (Kiefer, 1927)	+	-	-	-	-	-	-
13	<i>Thermocyclops oithonoides</i> (Sars, 1863)	+	+	+	+	+	+	+
14	<i>T. crassus</i> (Fischer, 1853)	-	-	-	-	+	-	-
15	<i>Mesocyclops leuckarti</i> (Claus, 1857)	+	+	+	+	+	+	+
16	<i>Holopedium gibberum</i> (Zaddach, 1855)	+	-	+	+	-	+	-
17	<i>Limnoscidea frontosa</i> (Sars, 1862)	+	+	+	-	+	+	-
18	<i>Latona setifera</i> (Müller, 1776)	-	+	-	-	-	-	-
19	<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Liëvin, 1848)	+	+	+	+	+	+	-

Окончание табл. 2
Table 2 (continued)

№ п/п Number	Вид Species	К3			К6			B1
		2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019
20	<i>Ceriodaphnia quadrangula</i> (Müller, 1785)	-	+	+	-	+	+	-
21	<i>Daphnia (D.) cristata</i> (Sars, 1862)	+	+	+	+	+	+	+
22	<i>D. (D.) galeata</i> (Sars, 1863)	+	-	+	+	+	+	+
23	<i>D. (D.) hyalina</i> (Leydig, 1860)	-	+	-	-	-	-	-
24	<i>Macrothrix rosea</i> (Lievin, 1848)	+	-	-	-	-	-	-
25	<i>Bosmina (B.) longirostris</i> (Müller, 1776)	-	+	-	-	-	+	-
26	<i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>coregoni</i> (Baird, 1857)	-	-	-	+	+	+	+
27	<i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (Lilljeborg, 1887)	+	+	+	+	+	+	-
28	<i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>longispina</i> (Leydig, 1860)	+	+	+	+	+	+	+
29	<i>Alona</i> sp. (Baird, 1843)	-	-	+	-	-	-	-
30	<i>A. quadrangularis</i> (Müller, 1785)	-	+	+	-	-	-	-
31	<i>Biapertura affinis</i> (Leydig, 1860)	-	-	-	-	-	+	-
32	<i>Alonella excisa</i> (Fischer, 1854)	-	-	-	-	+	-	-
33	<i>A. exigua</i> (Lilljeborg, 1853)	+	+	+	+	+	+	+
34	<i>A. nana</i> (Baird, 1850)	+	+	-	-	-	-	-
35	<i>Chydorus sphaericus</i> (Müller, 1776)	+	+	+	+	+	+	+
36	<i>Pleuroxus uncinatus</i> (Baird, 1850)	-	+	-	-	-	-	-
37	<i>Polyphemus pediculus</i> (Linnaeus, 1758)	-	-	-	-	-	+	-
38	<i>Leptodora kindtii</i> (Focke, 1844)	-	+	+	+	+	+	+
39	<i>Asplanchna</i> sp. (Gosse, 1850)	+	-	+	+	+	+	+
40	<i>Bipalpus hudsoni</i> (Imhof, 1891)	+	-	+	+	+	+	+
41	<i>Conochilus</i> sp. (Ehrenberg, 1834)	+	+	+	+	+	+	+
42	<i>Euchlanis dilatata</i> (Ehrenberg, 1832)	-	-	+	-	-	+	-
43	<i>Filinia longiseta</i> (Ehrenberg, 1834)	+	-	-	+	-	+	-
44	<i>Kellicottia longispina</i> (Kellicott, 1879)	+	+	+	+	+	+	+
45	<i>K. bostoniensis</i> (Rousselet, 1908)	-	-	+	-	-	-	-
46	<i>Keratella cohlearis</i> (Gosse, 1851)	+	+	+	+	+	+	+
47	<i>K. quadrata</i> (Müller, 1786)	+	-	+	-	-	+	-
48	<i>Lecane luna</i> (Müller, 1776)	-	+	-	-	-	-	-
49	<i>Notholca cinetura</i> (Skorikov, 1914)	-	-	-	-	+	-	-
50	<i>N. caudata</i> (Carlin, 1943)	-	-	+	+	-	-	+
51	<i>Philodina</i> sp. (Ehrenberg, 1930)	+	-	-	+	+	+	+
52	<i>Platyias quadricornis</i> (Ehrenberg, 1934)	+	-	-	-	-	-	-
53	<i>Polyarthra vulgaris</i> (Carlin, 1943)	-	-	-	-	+	+	-
54	<i>P. dolichoptera</i> (Idelson, 1925)	-	-	-	-	-	+	-
55	<i>P. remata</i> (Skorikov, 1896)	-	+	+	-	-	-	-
56	<i>P. major</i> (Burckhardt, 1900)	-	+	+	+	+	+	+
57	<i>Polyarthra</i> sp. (Ehrenberg, 1834)	-	-	+	-	-	-	-
58	<i>Synchaeta</i> sp. (Ehrenberg, 1832)	-	+	+	+	+	+	-
59	<i>Trichocerca</i> sp. (Lamarck, 1801)	-	-	+	-	-	+	-

Видовой состав зоопланктона и состав доминантного комплекса с 1960-х годов по настоящее время не претерпел существенных изменений. В структуре доминантного комплекса зоопланктона Кондопожской губы с конца прошлого века [Николаев и др., 1971; Онежское..., 2010; Крупнейшие..., 2015] выделялся *B. (E.) coregoni* cf. *longispina*, тогда как в настоящее время его место занял *B. (E.) coregoni* cf. *crassicornis*. Такое же явление наблюдается и в пелагиали Петрозаводской губы [Фомина, Сярки, 2018]. Кроме того, коловратка

K. bostoniensis, отмеченная нами в настоящем исследовании, ранее спорадически встречалась в пелагиали крупных заливов Онежского озера [Фомина, Сярки, 2015], соседнего Выгозерского водохранилища [Сярки, 2019] и ряда малых озер Карелии [Сярки, Здоровеннова, 2021; Sidorova et al., 2025].

Доминантный комплекс зоопланктона (табл. 3) исследуемых районов также был неоднороден. В вершинной части рассматриваемого залива он состоял преимущественно из ветвистых рачков рода *Daphnia (D.)* и *Bosmina (E.)*,

Таблица 3. Доминанты и субдоминанты зоопланктона исследуемых районов

Table 3. Dominant and subdominant species of zooplankton of the studied area

Год Year	Доминанты по численности (доля, %) Dominant in number (percentage, %)	Доминанты по биомассе (доля, %) Dominant in biomass (percentage, %)	$H_N H_B$
K3			
2019	<i>D. (D.) cristata</i> (38,3) <i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (33,4) <i>K. longispina</i> (15,7)	<i>D. (D.) cristata</i> (53,47) <i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (31,02)	2.3 1.9
2020	<i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (67,2) <i>D. (D.) cristata</i> (11,1) <i>T. oithonoides</i> (6,13)	<i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (37,62) <i>D. (D.) cristata</i> (26,7) <i>T. oithonoides</i> (9,4) <i>E. lacustris</i> (6,27) <i>M. leuckarti</i> (5,49)	1.9 2.7
2021	<i>Synchaeta</i> sp. (26,2) <i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (14,98) <i>K. cochlearis</i> (14,6) <i>D. (D.) cristata</i> (13,7) <i>K. longispina</i> (10,8) <i>Asplanchna</i> sp. (8,3)	<i>Asplanchna</i> sp. (38,5) <i>D. (D.) cristata</i> (26,1) <i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (19,56)	3.05 2.46
K6			
2019	<i>L. macrurus</i> (22,5) <i>K. longispina</i> (18,3) <i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>crassicornis</i> (16,32) <i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>longispina</i> (10,74) <i>D. (D.) cristata</i> (9,78) <i>E. gracilis</i> (6,9) <i>T. oithonoides</i> (5,9)	<i>L. macrurus</i> (80,5)	3.2 1.3
2020	<i>K. longispina</i> (24,06) <i>(D.) cristata</i> (16,4) <i>T. oithonoides</i> (11,8) <i>P. major</i> (10,47)	<i>L. macrurus</i> (24,97) <i>D. (D.) cristata</i> (23,67) <i>T. oithonoides</i> (9,9) <i>E. lacustris</i> (6,64) <i>Asplanchna</i> sp. (6,34) <i>E. gracilis</i> (6,21)	3.57 3.51
2021	<i>Synchaeta</i> sp. (33,07) <i>K. longispina</i> (24,78) <i>Asplanchna</i> sp. (6,35) <i>D. (D.) cristata</i> (5,07)	<i>Asplanchna</i> sp. (31,1) <i>L. macrurus</i> (30,3) <i>D. (D.) cristata</i> (7,37) <i>D. brachyurum</i> (5,45)	3.19 2.95
B1			
2019	<i>K. longispina</i> (24,45) <i>L. macrurus</i> (18,13) <i>B. (E.) coregoni</i> cf. <i>longispina</i> (16) <i>Asplanchna</i> sp. (10,1) <i>D. (D.) cristata</i> (6,4) <i>E. gracilis</i> (5,98) <i>E. lacustris</i> (5,15)	<i>L. macrurus</i> (68,35) <i>Asplanchna</i> sp. (12,31) <i>E. lacustris</i> (6,09)	3.2 1.75

Примечание. H_N – индекс Шеннона – Уивера по численности; H_B – индекс Шеннона – Уивера по биомассе.

Note. H_N – the Shannon – Weaver index, calculated by number; H_B – the Shannon – Weaver index, calculated by biomass.

а также коловраток рода *Asplanchna* и *K. longispina*. Несмотря на большое количество видов (31), здесь отмечены наименьшие значения индекса Шеннона – Уивера, связанные с преобладанием указанных видов. На глубоководных станциях центральной части Кондопожской губы и в заливе Большое Онего в доминантном комплексе преобладающую роль играли копеподы, в частности реликтовый рачок *L. macrurus*, доля биомассы которого в сообществе в разные годы составляла от 22,5 до 79,4 %.

Обилие и структура сообществ зоопланктона различались как между станциями, так и по годам на одной станции (табл. 4). В 2019 году наблюдались сниженные количественные показатели зоопланктона относительно среднемноголетних во всех районах исследования. В 2021 г. сложилась иная ситуация: в вершинной части залива обилие зоопланктона было примерно в 4 раза больше среднемноголетнего значения за счет высокого числа ветвистых рачков и коловраток.

Таблица 4. Описательная статистика

Table 4. Descriptive statistics

Параметр Parameter		1965–2018 гг.			Современное состояние Current state		
		n	Min Max	Среднее ± ошибка среднего Average ± Se	2019	2020	2021
Вершинная часть Кондопожской губы / The top part of Kondopoga Bay							
Численность, тыс. экз./м ² Number, thousands of individuals/m ²	Общая Total	7	106,1 1619,9	788,4 ± 116,69	312,86↓	793,91	3798,34↑
	Calanoida		1,17 262,43	51,97 ± 15,5	9,83↓	32,28	114,65↑
	Cyclopoida		9,83 405,87	119,69 ± 26,79	33,66↓	157,26	457,12↑
	Cladocera		55,73 1119,3	397,38 ± 76,16	199,21↓	567,16↑	1028,80↑
	Rotifera		12,24 769,3	219,36 ± 45,26	70,16↓	37,21↓	2197,76↑
Биомасса, г/м ² Biomass, g/m ²	Общая Total	7	3,23 59,9	19,32 ± 3,52	7,52↓	12,64	63,62↑
	Calanoida		0,02 7,14	1,65 ± 0,44	0,52↓	1,32	1,48
	Cyclopoida		0,08 2,8	1,05 ± 0,21	0,12↓	2,29↑	4,61↑
	Cladocera		1,17 40,05	13,07 ± 2,68	6,52↓	9,01↓	30,6↑
	Rotifera		0,09 15,8	3,54 ± 1,14	0,36↓	0,02↓	26,92↑
Центральная часть Кондопожской губы / The central part of Kondopoga Bay							
Численность, тыс. экз./м ² Number, thousands of individuals/m ²	Общая Total	16	248,86 932,3	451,23 ± 46,22	332,64↓	745,59↑	586,34↑
	Calanoida		9,76 222,05	96,69 ± 15,68	100,98	145,49↑	41,57↓
	Cyclopoida		35,01 213,58	88,14 ± 11,42	106,19↑	247,55↑	100,81
	Cladocera		29,57 455,6	121,95 ± 25,52	74,99↓	151,12↑	77,6↓
	Rotifera		41,01 373,6	144,44 ± 24,67	50,48↓	201,42↑	366,36↑
Биомасса, г/м ² Biomass, g/m ²	Общая Total	16	7,16 28,29	13,42 ± 1,74	18,5↑	12,75	10,2↓
	Calanoida		1,14 8,64	4,26 ± 0,51	15,58↑	4,54	3,48↓
	Cyclopoida		0,39 2,1	0,89 ± 0,11	0,378↓	2,67↑	1,01
	Cladocera		0,64 17,18	4,16 ± 0,93	2,16↓	4,67	2,22↓
	Rotifera		0,03 15,48	4,11 ± 1,25	0,39↓	0,86↓	3,49
Залив Большое Онего / Bolshoe Onego Bay							
Численность, тыс. экз./м ² Number, thousands of individuals/m ²	Общая Total	13	9,43 560,53	303,97 ± 43,23	68,97↓	–	–
	Calanoida		7,25 178,58	79,79 ± 14,65	13,22↓	–	–
	Cyclopoida		19,34 113,91	64,28 ± 7,67	35,23↓	–	–
	Cladocera		12,28 149,4	70,44 ± 12,11	8,04↓	–	–
	Rotifera		11,48 216,9	89,45 ± 20,13	12,48↓	–	–
Биомасса, г/м ² Biomass, g/m ²	Общая Total	13	2,15 14,56	8,81 ± 1,02	2,78↓	–	–

Окончание табл. 4
Table 4 (continued)

Параметр Parameter		1965–2018 гг.			Современное состояние Current state		
		n	Min Max	Среднее ± ошибка среднего Average ± Se	2019	2020	2021
Биомасса, г/м ² Biomass, g/m ²	Calanoida	13	0,84 6,73	3,15 ± 0,42	2,12↓	–	–
	Cyclopoida		0,1 1,85	0,74 ± 0,14	0,08↓	–	–
	Cladocera		0,44 5,11	2,62 ± 0,35	0,24↓	–	–
	Rotifera		0,08 6,3	2,29 ± 0,6	0,34↓	–	–

Примечание. Стрелка в столбцах с современным состоянием указывает на большее или меньшее наблюдаемое значение относительно среднего.

Note. The arrow in the columns with the current state indicates whether the observed value is higher or lower than the average one.

В настоящее время сохраняется градиент трофических условий от вершинной части залива к открытому плесу (рис. 3), определяющий обилие зоопланктона и структуру сообществ, которые, несмотря на межгодовые колебания, ежегодно воспроизводятся.

В вершинной части залива обилие традиционно более высокое и обусловлено влиянием сточных вод Кондопожского ЦБК. В истории его функционирования наблюдалось несколько важных периодов, которые отражены в количественных показателях зоопланктона. Первый период (1960–70-е годы) характеризовался малым объемом сточных вод (до 20 т/год⁻¹), которые сбрасывались без очистки. Это отразилось на экологическом состоянии вершинной части залива: в месте сброса сточных вод сформировалась техногенная «пустыня» [Тимакова и др., 2014], а обилие зоопланктона в этот период было низким (рис. 3, А; 4, А).

Второй этап (с 1980-х до 1990-х гг.) характеризовался наращиванием производственных мощностей, повышенным поступлением биогенов из-за введения в эксплуатацию станции биологической очистки сточных вод и увеличением их объема (до 120 т/год⁻¹), вследствие чего наблюдались высокие количественные показатели зоопланктона [Тимакова и др., 2014].

Поскольку ст. К6 в центральной части залива расположена в относительной близости от места сброса сточных вод (~15 км), их воздействие на сообщества зоопланктона этого района наблюдается эпизодически [Сярки, Фомина, 2019б]. В настоящее время существует также влияние форелевых хозяйств на сообщества зоопланктона Кондопожской губы. Исследования фитопланктона этого района в августе 2019 г. показали достоверное увеличение его численности и биомассы [Смирнова и др., 2024] и концентрации общего фосфора [Galakhina et al., 2022], вызванное деятельностью форелевых хозяйств, распо-

ложенных недалеко от станции. Воздействие форелевых хозяйств на сообщества зоопланктона Кондопожской губы отмечалось только в районе их расположения (рис. 1) [Фомина и др., 2019].

В последние годы наблюдаются аномальные явления в функционировании сообществ зоопланктона, указывающие на некоторое нарушение стабильности планктонной системы. Нестабильность может характеризоваться нарушением естественной фенологии сообществ и пиков их обилия [Richardson, 2008; Moe et al., 2022], выпадением отдельных видов из сообщества [Вежновец, 2017], общим снижением плотности зоопланктона [Panja et al., 2024]. Причинами этих явлений авторы называют антропогенное влияние и изменение климата.

Признаки нарушения стабильности планктонной системы наблюдаются и в пелагиали Онежского озера.

Смещение сроков весеннего развития организмов на более ранние, вызванное изменением естественного гидротермического режима, описано в ряде работ по исследованию фенологии зоопланктона Онежского озера [Сярки, Фомина, 2015, 2019а; Фомина, Сярки, 2015; Фомина, 2022; Коновалов, Сярки, 2024; Сярки, 2024].

Другим признаком нарушения стабильности планктонной системы, отмеченным в настоящем исследовании, является увеличение амплитуды межгодовых колебаний и пиков обилия зоопланктона. Так, в вершинной части Кондопожской губы летом 2021 г. отмечались наибольшие с 1989 г. показатели биомассы зоопланктона, вызванные интенсивным развитием ветвистых рачков и коловраток из родов *Asplanchna* и *Synchaeta* (рис. 4). В центральной части залива наблюдалась схожая ситуация. Известно, что массовое развитие коловраток рода *Asplanchna* обычно приурочено к периодам с высокой численностью мелких коловраток [Gilbert, 1980; Куликова и др., 1997].

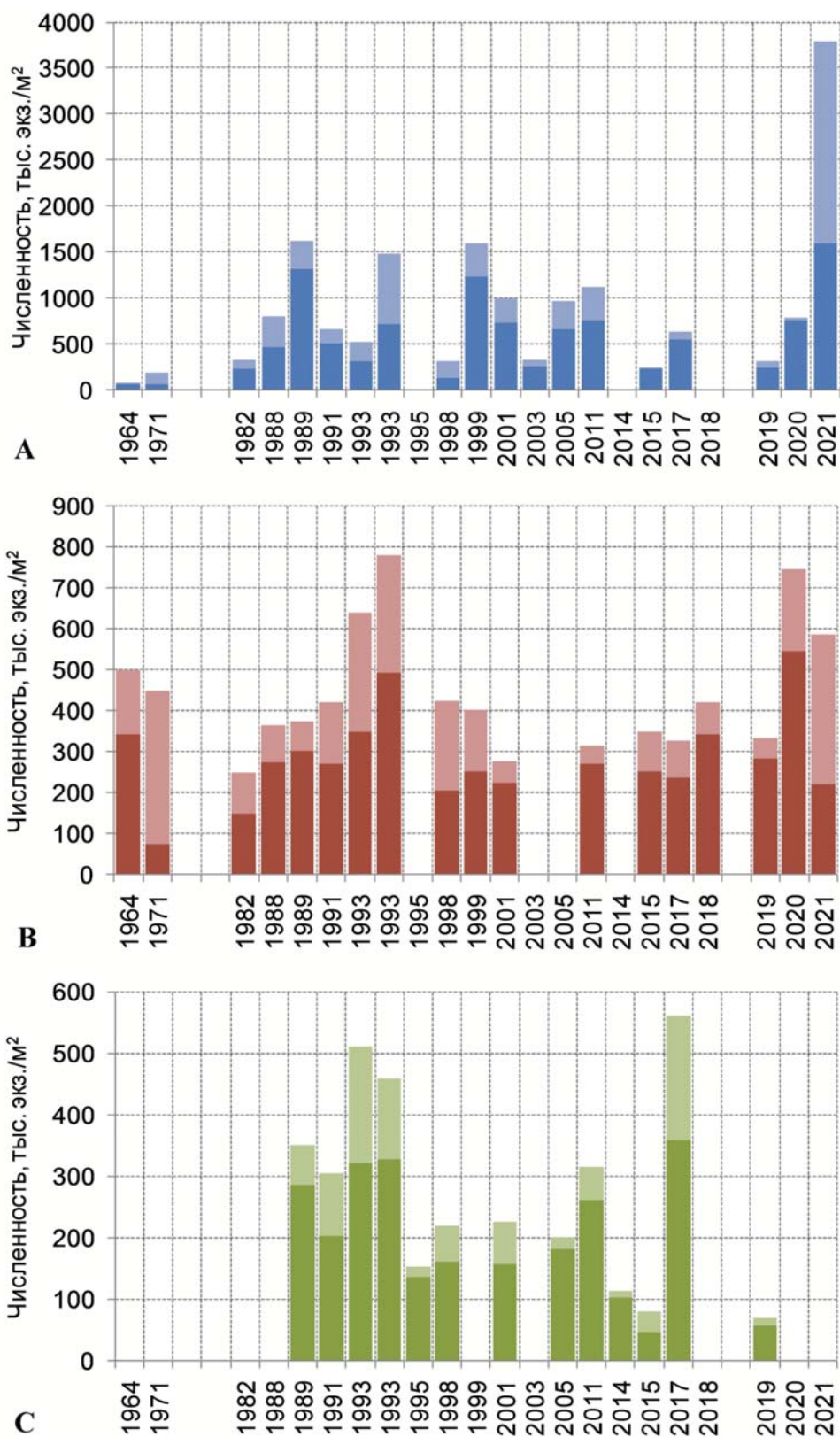


Рис. 3. Многолетняя динамика численности (под м²) летнего зоопланктона исследуемых районов.

Здесь и на рис. 4: рачковый планктон – темные оттенки, коловратки – светлые

Fig. 3. Long-term dynamics of numbers (under m²) of summer zooplankton in the studied area.

Here and in Fig. 4: crustacean zooplankton – light shades, rotifers – dark shades

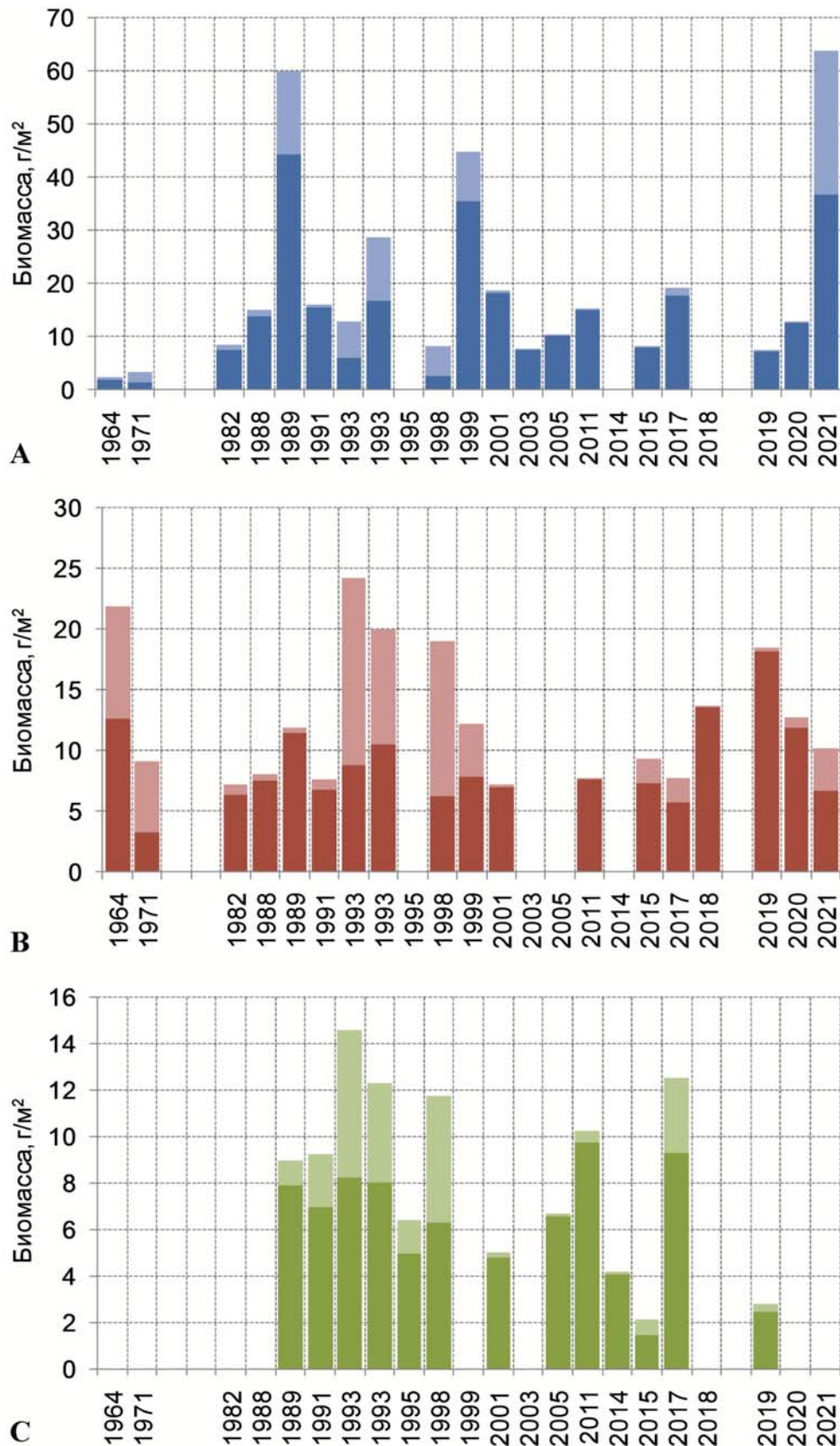


Рис. 4. Многолетняя динамика биомассы (под m^2) летнего зоопланктона исследуемых районов

Fig. 4. Long-term dynamics of biomass (under m^2) of summer zooplankton in the studied area

Кроме того, в 2019 г. впервые за историю наблюдений в центральной части залива в августе было зафиксировано высокое (численность 0,56 тыс. экз./м³ в среднем по слоям и 42 тыс. экз./м² в столбе воды) обилие реликтового рачка *L. macrurus*. Такое же явление наблюдалось на других участках Кондопожской губы и в заливе Большое Онего (табл. 2). Для залива Большое Онего это объясняется низкой температурой поверхностного слоя воды в августе 2019 г. (рис. 2) – ниже среднегодовой на 8 °С [Онежское..., 2010], которая была вызвана, вероятно, штормовыми явлениями в период, предшествовавший отбору проб. Это повлекло за собой преобладание в сообществе рачков *L. macrurus* при общей низкой численности зоопланктона. Однако подобный феномен в других указанных районах требует дальнейших исследований.

Заключение

Оценка состояния зоопланктона Кондопожской губы показала, что в планктонных сообществах, по сравнению с предыдущими десятилетиями, не произошло серьезных изменений. Сохраняются видовой состав и градиент обилия зоопланктона от вершинной части залива к открытой части озера, определенные изменениями трофических условий, вызванными деятельностью ЦБК. Однако за период 2019–2021 гг. наблюдались явления, указывающие на признаки нарушения стабильности планктонной системы, а именно:

- в количественных показателях – увеличение амплитуды межгодовых колебаний и пиков обилия всего зоопланктона. В 2021 г. отмечалось чрезвычайно высокое обилие (253,2 тыс. экз./м³ и 4,2 г/м³) в вершинной части залива;

- в структурных – в доминантном комплексе, по сравнению с предыдущими десятилетиями, произошли изменения в соотношении близких видов рода *Bosmina* (*Eubosmina*), которые, предположительно, являются первыми признаками реакции сообщества на изменение климата;

- в количественных показателях массовых видов – экстремально высокое обилие реликтового рачка *L. macrurus* в 2019 г., впервые наблюдаемое в различных районах Онежского озера.

Несмотря на отмеченные первые признаки дестабилизации, планктонные сообщества сохраняют свою стабильность и устойчивость к антропогенным факторам и изменению климата. Полученные результаты и продолжающееся водопользование в Кондопожской губе

обуславливают актуальность дальнейших наблюдений и исследований состояния планктонных сообществ, построения долгосрочных прогнозов их изменений.

Литература

Балаганский А. Ф., Карпечко В. А., Литвиненко А. В., Сало Ю. А. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрологический режим. Ресурсы речного стока и водный баланс // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 31–38.

Вежновец В. В. Влияние повышения температуры на состояние популяции реликтового рачка *Limnocalanus macrurus* Sars в мезотрофном озере // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2017. Т. 61, № 1. С. 73–77.

Галахина Н. Е., Зобков М. Б. Гидрохимические исследования в районе расположения форелевых хозяйств в Кондопожской губе Онежского озера в зимний период 2022 года // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 76–87. doi: 10.17076/lim1599

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2020 году / Ред. А. Н. Громцев. Петрозаводск, 2021. 277 с.

Здоровеннов Р. Э., Зимон О. В. Синоптическая изменчивость течений в Онежском озере // Водная среда Карелии: исследование, использование, охрана: Мат-лы II Республ. школы-конф. молодых ученых (Петрозаводск, 20–21 февраля 2006 г.). Петрозаводск, 2006. С. 54–57.

Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Маммарелла И., Ояла А., Хейсканен Ю., Терзевик А. Ю. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149, № 6. С. 59–74.

Зобкова М. В. Оценка автохтонной, аллохтонной и антропогенной составляющей органического вещества в поверхностных водах (на примере водных объектов Карелии): Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Петрозаводск, 2024. 20 с.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Белкина Н. А., Назарова Л. Е., Макарова Е. М., Ефремова Т. В., Георгиев А. П., Здоровеннов Р. Э., Потахин М. С., Рябинкин А. В. Результаты экспедиционных исследований в 2020 году на Онежском озере и Выгозерском водохранилище с целью изучения отклика крупных водоемов на антропогенное воздействие и изменение климата // Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах: Тезисы докл. Всерос. науч. конф. (Москва, 24–26 февр. 2021 г.). Севастополь, 2021. С. 164–171.

Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сярки М. Т., Георгиев А. П., Исакова К. В., Толстикова А. В., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского

водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла *a*, продукция фитопланктона. Св-во о гос. регистрации базы данных № 2023621189. Правообладатель: КарНЦ РАН (RU). Дата регистрации в Реестре баз данных: 12 апреля 2023 г.

Коновалов Д. С., Сярки М. Т. Сезонная динамика зоопланктона Кондопожского залива Онежского озера // 13-й съезд Гидробиологического общества при Российской академии наук: Тезисы докл. конф. (Архангельск, 16–20 сентября 2024 г.). Архангельск, 2024. С. 32–33.

Коровчинский Н. М., Котов А. А., Синев А. Ю., Неретина А. Н., Гарибян П. Г. Ветвистоусые ракообразные (Crustacea: Cladocera) Северной Евразии Т. II. / Ред. Н. М. Коровчинский, А. А. Котов. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2021. 544 с.

Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 375 с.

Куликова Т. П., Кустовлянкина Н. Б., Сярки М. Т. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1997. 112 с.

Куликова Т. П., Сярки М. Т. Размерно-весовая характеристика массовых видов ракообразных и коловраток Онежского озера: Справочно-информационный материал. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1994. 15 с.

Литвинова И. А., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Макарова Е. М., Ефимова А. Н. Антропогенная нагрузка и биоиндикация состояния Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). База данных. Св-во о гос. регистрации № 2021620975. Правообладатель: КарНЦ РАН (RU). Дата регистрации в Реестре баз данных: 17 мая 2021 г.

Лозовик П. А., Зобков М. Б., Бородулина Г. С., Токарев И. В. Оценка внешнего водообмена заливов озер по химическим показателям воды // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 1. С. 91–101. doi: 10.31857/S0321-059646191-101

Методы гидробиологических исследований внутренних вод / Ред. А. В. Крылов. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с.

Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинкина Н. М., Балаганский А. Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия РГО. 2024. Т. 15, № 1. С. 28–36. doi: 10.31857/S0869607122010086

Николаев И. И., Смирнова Т. С., Мажекайте С. И., Нгуен Тьонг. Зоопланктон Онежского озера / Ред. И. И. Николаев. Л.: Наука, 1971. 327 с.

Онежское озеро. Атлас / Ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Зоопланктон / Ред. В. Р. Алексеев, С. Я. Цалолохин. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2010. 495 с.

Сабылина А. В. Современное состояние и изменение экосистемы Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища). Гидрохимические исследо-

вания. Внешняя нагрузка на озеро // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 68–72.

Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б. Химический состав воды Онежского озера и его притоков // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 6. С. 717–729.

Смирнова В. С. Реакция фитопланктона Онежского озера на потепление климата // Актуальные проблемы планктонологии: Мат-лы IV Всерос. конф. с междунар. участием (Светлогорск, 25–30 сент. 2022 г.). Калининград, 2022. С. 185–191.

Смирнова В. С., Теканова Е. В., Калинкина Н. М. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях садкового выращивания форели // Трансформация экосистем. 2024. Т. 7, № 1. С. 177–195. doi: 10.23859/estr-220822

Сярки М. Т. Вселение американской коловратки *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) в Выгозерское водохранилище (Республика Карелия) // Российский журнал биологических инвазий. 2019. Т. 12, № 3. С. 111–116.

Сярки М. Т. Подходы и методы исследования сезонной динамики зоопланктона крупного озера // Принципы экологии. 2024. № 4. С. 48–58. doi: 10.15393/j1.art.2024.15263

Сярки М. Т., Здоровеннова Г. Э. Видовой состав зоопланктона озера Вендюрского (Республика Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 8. С. 80–89. doi: 10.17076/bg1451

Сярки М. Т., Куликова Т. П. Зоопланктон Онежского озера. Св-во о гос. регистрации базы данных № 2012621150. Правообладатель: КарНЦ РАН (RU). Дата регистрации в Реестре баз данных: 9 ноября 2012 г.

Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Планктон пелагиали Онежского озера. Св-во о гос. регистрации базы данных № 2015620274. Правообладатель: КарНЦ РАН (RU). Дата регистрации в Реестре баз данных: 13 февраля 2015 г.

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Зоопланктон Онежского озера, его Центрального плеса и залива Большое Онего в различные по температурному режиму годы // Труды Карельского научного центра РАН. 2019а. № 9. С. 104–115. doi: 10.17076/lim982

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Сезонные изменения в зоопланктоне Петрозаводской губы Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 63–68. doi: 10.17076/eco37

Сярки М. Т., Фомина Ю. Ю. Современное состояние зоопланктона Кондопожского залива Онежского озера // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019б. Т. 2, № 3. С. 33–40. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_3_33

Теканова Е. В., Рыжаков А. В., Калинкина Н. М., Дмитриева Д. А., Фомина Ю. Ю., Макарова Е. М. Состояние экосистемы Кондопожской губы Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Мат-лы II Междунар. конф. (Казань, 19–24 мая 2019 г.). Казань, 2019. С. 190–194.

Тимакова Т. М., Куликова Т. П., Литвинова И. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т., Теканова Е. В., Чекрыжева Т. А. Изменение биоценозов Кондопожской губы Онежского озера под влиянием сточных вод целлюлозно-бумажного комбината // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 1. С. 74–82. doi: 10.7868/S032105961401012X

Филатов Н. Н., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Назарова Л. Е., Пальшин Н. И., Руховец Л. А., Толстиков А. В., Шаров А. Н. Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата // Доклады Академии наук. 2012а. Т. 444, № 5. С. 554–557.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р., Ожигина В. Н., Богдан М. И. Изменения и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. 2012б. № 2. С. 6.

Филатов Н. Н., Трифонова И. С., Румянцев В. А. Достижения Академии наук России в исследовании озер за три столетия (обзор) // Водные ресурсы. 2024. Т. 51, № 4. С. 371–392. doi: 10.31857/S0321059624040017

Фомина Ю. Ю. Структурно-функциональная организация и фенология пелагического зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2022. 22 с.

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Зоопланктон Онежского озера, биоразнообразии и продуктивности // Биоразнообразие наземных и водных животных. Зооресурсы: Сб. трудов III Всерос. науч. интернет-конф. с междунар. участием. Казань, 2015. С. 71–74.

Фомина Ю. Ю., Сярки М. Т. Современное состояние зоопланктона Петрозаводской губы Онежского озера и его отклик на изменение климата // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 54–64. doi: 10.17076/lim820

Фомина Ю. Ю., Теканова Е. В., Калинин Н. М. Биоиндикация современного состояния Кондопожского залива Онежского озера в районе расположения форелевых хозяйств по показателям зоопланктона // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 2. С. 20–26. doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_2_20

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // Environ. Nanotechnol. Monit. Manag. 2022. Vol. 17. Art. 100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Gilbert J. J. Observation on the susceptibility of protist and rotifers to predation by *Asplanchna girodi* // Hydrobiology. 1980. Vol. 73. P. 1440–1450.

Moe J., Hobæk A., Persson J., Skjelbred B., Løvik J. Shifted dynamics of plankton communities in a restored lake: Exploring the effects of climate change on phenology through four decades // Clim. Res. 2022. Vol. 86. P. 125–143. doi: 10.3354/cr01654

Panja P., Kar T., Jana D. K. Impacts of global warming on phytoplankton–zooplankton dynamics: a modelling study // Environ. Dev. Sustain. 2024. Vol. 26, no. 5. P. 13495–13513. doi: 10.1007/s10668-023-04430-3

Richardson A. J. In hot water: zooplankton and climate change // ICES J. Mar. Sci. 2008. Vol. 65, no. 3. P. 279–295. doi: 10.1093/icesjms/fsn028

Sidorova A. I., Syarki M. T., Slastina Yu. L. Current state of the ecosystem of Lake Vedlozero and its biological resources (Republic of Karelia, northwestern Russia) // Limnol. Freshwat. Biol. 2025. No. 1. P. 1–19. doi: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-1

References

Alekseev V. R., Tsalolikhin S. Ya. (eds.). An identification guide to zooplankton and zoobenthos in fresh waters of European Russia. Vol. 1. Zooplankton. Moscow: KMK; 2010. 495 p. (In Russ.)

Balaganskii A. F., Karpechko V. A., Litvinenko A. V., Salo Yu. A. Current state and changes in the Lake Onego ecosystems (Verkhne-Svirsky Reservoir). Hydrological regime. River flow resources and water balance. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozmozhnostyakh = The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 31–38. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 375 p. (In Russ.)

Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)

Filatov N. N., Georgiev A. P., Efremova T. V., Nazarova L. E., Pal'shin N. I., Ruhovets L. A., Tolstikov A. V., Sharov A. N. Response of lakes in Eastern Fennoscandia and Eastern Antarctica to climate changes. *Doklady Earth Sciences*. 2012;444(2):752–755. doi: 10.1134/S1028334X1206013X

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R., Ozhigina V. N., Bogdan M. I. Climate changes and variability in the European North of Russia and their impact on water bodies. *Arktika: ekologiya i ekonomika = The Arctic: Ecology and Economics*. 2012;2:6. (In Russ.)

Filatov N. N., Trifonova I. S., Rumyantsev V. A. Achievements of the Russian Academy of Sciences in the study of lakes over three centuries (a review). *Vodnye resursy = Water Resources*. 2024;51(4):371–392. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059624040017

Fomina Yu. Yu. Structural and functional organization and phenology of pelagic zooplankton of the Petrozavodsk Bay of Lake Onego: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Petrozavodsk; 2022. 22 p. (In Russ.)

Fomina Yu. Yu., Syarki M. T. Modern state of zooplankton and its response to climate change in Petrozavodsk Bay of Lake Onego. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2018;9:54–64. (In Russ.). doi: 10.17076/lim820

Fomina Yu. Yu., Syarki M. T. Zooplankton of Lake Onega, biodiversity and productivity. *Bioraznoobrazie nazemnykh i vodnykh zhivotnykh. Zoosursy: Sb. trudov III Vseros. nauch. internet-konf. s mezhdunar. uchastiem = Biodiversity of terrestrial and aquatic*

animals. *Animal resources: Proceedings of the III All-Russ. scientific Internet conf. with int. part. Kazan'*; 2015. P. 71–74. (In Russ.)

Fomina Yu. Yu., Tekanova E. V., Kalinkina N. M. Bioindication of the current state of the Kondopoga Bay of Lake Onega in the areas, affected by trout farms, through the use of zooplankton. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya = Aquatic Bioresources and Habitat*. 2019;2(2):20–26. (In Russ.). doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_2_20

Galakhina N. E., Zobkov M. B. Hydrochemical studies of the trout farming area in Kondopoga Bay of Lake Onega in the winter of 2022. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2022;6:76–87. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1599

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onega and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2022;17:100619. doi: 10.1016/j.enmm.2021.100619

Gilbert J. J. Observation on the susceptibility of protist and rotifers to predation by *Asplanchna girodi*. *Hydrobiology*. 1980;73:1440–1450.

Gromtsev A. N. (ed.). The state report on the state of the environment in the Republic of Karelia in 2020. Petrozavodsk; 2021. 277 p. (In Russ.)

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Belkina N. A., Nazarova L. E., Makarova E. M., Efremova T. V., Georgiev A. P., Zdorovenov R. E., Potakhin M. S., Ryabinkin A. V. The results of expedition research in 2020 on Lake Onega and the Vygozersk reservoir in order to study the response of large reservoirs to anthropogenic impact and climate change. *Itogi ekspeditsionnykh issledovaniy v 2020 godu v Mirovom okeane i vnutrennikh vodakh: Tezisy dokl. Vseros. nauch. konf. (Moskva, 24–26 fevr. 2021 g.) = The results of expeditionary research in 2020 in the World Ocean and inland waters: abstracts of the All-Russ. scientific conf. (Moscow, Feb. 24–26, 2021)*. Sevastopol'; 2021. P. 164–171. (In Russ.)

Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Syarki M. T., Georgiev A. P., Isakova K. V., Tolstikov A. V., Zdorovenov R. E., Smirnova V. S. Limnological indicators of the state of Lake Onega and the Vygozersky Reservoir: water temperature, chlorophyll a concentration, phytoplankton production. The certificate of the state registration of database No. 2023621189. Copyright holder: KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 12.04.2023. (In Russ.)

Konovalov D. S., Syarki M. T. Seasonal dynamics of zooplankton in the Kondopoga Bay of Lake Onega. *13-i s"ezd Gidrobiologicheskogo obshchestva pri Rossiiskoi akademii nauk: tezisy dokl. konf. (Arkhangel'sk, 16–20 sentyabrya 2024 g.) = 13th Congress of the Hydrobiological Society of the Russian Academy of Sciences: Abstracts of the conf. (Arkhangelsk, Sept. 16–20, 2024)*. Arkhangel'sk; 2024. P. 32–33. (In Russ.)

Korovchinskii N. M., Kotov A. A., Sinev A. Yu., Neretina A. N., Garibyan P. G. Branchous crustaceans (Crustacea: Cladocera) in Northern Eurasia. Vol. II. Moscow: KMK; 2021. 544 p. (In Russ.)

Krylov A. V. (ed.). Methods of hydrobiological studies of inland waters. Yaroslavl': Filigran'; 2024. 592 p. (In Russ.)

Kulikova T. P., Kustovlyankina N. B., Syarki M. T. Zooplankton as a component of the ecosystem of Lake Onega. Petrozavodsk: KarRC RAS; 1997. 112 p. (In Russ.)

Kulikova T. P., Syarki M. T. Size and weight characteristics of the mass species of crustaceans and rotifers of Lake Onega: reference and information material. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1994. 15 p. (In Russ.)

Litvinova I. A., Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Makarova E. M., Efimova A. N. Anthropogenic load and bioindication of the state of Lake Onega (Verkhne-Svirsky Reservoir). The database. The certificate of the state registration of database No. 2021620975. Copyright holder: NWPI KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 17.05.2021. (In Russ.)

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Assessing external water exchange of lake bays by water chemistry characteristics. *Water Resources*. 2019;46(1):94–102. doi: 10.1134/S0097807818050123

Moe J., Hobæk A., Persson J., Skjelbred B., Løvik J. Shifted dynamics of plankton communities in a restored lake: Exploring the effects of climate change on phenology through four decades. *Clim. Res.* 2022;86:125–143. doi: 10.3354/cr01654

Nazarova L. E., Isakova K. V., Kalinkina N. M., Balaganskii A. F. The climate warming influence on the Shuya River winter runoff and the consequences for the zoobenthos of Lake Onega. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2024;154(1):28–36. (In Russ.)

Nikolaev I. I., Smirnova T. S., Mazhekaite S. I., Nguen Tyong. Zooplankton of Lake Onega. Leningrad: Nauka; 1971. 327 p. (In Russ.)

Panja P., Kar T., Jana D. K. Impacts of global warming on phytoplankton–zooplankton dynamics: a modelling study. *Environ. Dev. Sustain.* 2024;26(5):13495–13513. doi: 10.1007/s10668-023-04430-3

Richardson A. J. In hot water: zooplankton and climate change. *ICES J. Mar. Sci.* 2008;65(3):279–295. doi: 10.1093/icesjms/fsn028

Sabylina A. V. Current state and changes in the ecosystem of Lake Onega (Verkhne-Svirsky Reservoir). Hydrochemical studies. External load on the lake. *Krupneishie ozera-vodokhranilishcha Severo-Zapada evropeiskoi territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennykh vozdeistviyakh = The largest lakes-reservoirs in the north-west of the European part of Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impact*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 68–72. (In Russ.)

Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B. Chemical composition of the water of Lake Onega and its tributaries. *Water Resources*. 2010;37(6):717–729. (In Russ.)

Sidorova A. I., Syarki M. T., Slastina Yu. L. Current state of the ecosystem of Lake Vedlozero and its biological resources (Republic of Karelia, northwestern Russia). *Limnol. Freshwat. Biol.* 2025;1:1–19. doi: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-1

Smirnova V. S. The reaction of phytoplankton of Lake Onega to climate warming. *Aktual'nye problemy planktonologii: Mat-ly IV Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem (Svetlogorsk, 25–30 sent. 2022 g.) = Topical*

problems of planktology: Proceedings of the IV All-Russ. conf. with int. part. (Svetlogorsk, Sept. 25-30, 2022). Kaliningrad; 2022. P. 185–191. (In Russ.)

Smirnova V. S., Tekanova E. V., Kalinkina N. M. Phytoplankton as an indicator of the ecosystem state of Kondopoga Bay of Lake Onego under cage trout farming. *Transformatsiya ekosistem = Ecosystem Transformation*. 2024;7(1):177–195. (In Russ.). doi: 10.23859/estr-220822

Syarki M. T. Approaches and methods for studying the seasonal dynamics of zooplankton in a large lake. *Printsipy ekologii = Principles of the Ecology*. 2024; 4:48–58. (In Russ.). doi: 10.15393/j1.art.2024.15263

Syarki M. T. The invasion of the American rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) into Vygozersky reservoir (Republic of Karelia). *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii = Russian Journal of Biological Invasions*. 2019;12(3):111–116. (In Russ.)

Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Seasonal changes in zooplankton in Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2015;1:63–68. (In Russ.). doi: 10.17076/eco37

Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. The current state of zooplankton in the Kondopoga Bay of Lake Onega. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya = Water Resources and the Habitat*. 2019;2(3):33–40. (In Russ.). doi: 10.47921/2619-1024_2019_2_3_33

Syarki M. T., Fomina Yu. Yu. Zooplankton of Lake Onego in its Central part and Bolshoe Onego Bay in years with different temperature conditions. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2019;9:104–115. (In Russ.). doi: 10.17076/lim982

Syarki M. T., Kulikova T. P. Zooplankton of Lake Onego. The certificate of the state registration of database No. 2012621150. Copyright holder: NWPI KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 9.11.2012. (In Russ.)

Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. Plankton of the pelagic Lake Onega. The certificate of the state registration of database No. 2015620274. Copyright holder: NWPI KarRC RAS (RU). The date of the registration in the register of databases: 13.02.2015. (In Russ.)

Syarki M. T., Zdorovenнова G. E. Zooplankton species composition of Lake Vendyurskoe (Republic of Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2021; 8:80–89. (In Russ.). doi: 10.17076/bg1451

Tekanova E. V., Ryzhakov A. V., Kalinkina N. M., Dmitrieva D. A., Fomina Yu. Yu., Makarova E. M. The state of the ecosystem of the Kondopoga Bay of Lake Onega under conditions of multifactorial impact. *Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Mat-ly II Mezhdunar. konf. (Kazan', 19–24 maya 2019 g.) = Lakes of Eurasia: problems and solutions: Proceedings of the II Int. conf. (Kazan, May 19-24, 2019)*. Kazan'; 2019. P. 190–194. (In Russ.)

Timakova T. M., Kulikova T. P., Litvinova I. A., Polyakova T. N., Syarki M. T., Tekanova E. V., Chekryzheva T. A. Changes in biocenoses of Kondopoga Bay, Lake Onego, under the effect of effluents from a pulp and paper mill. *Water Resources*. 2014;41(1):78–86. doi: 10.1134/S0097807814010126

Vezhnovets V. V. The effect of temperature rise on the population of the relict crustacean *Limnocalanus macrurus* Sars in a mesotrophic lake. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2017;61(1):73–77. (In Russ.)

Zdorovenнова G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen Yu., Terzhevik A. Yu. Evolution of the temperature of the water column of boreal lakes against the background of changes in the regional climate. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2017;149(6): 59–74. (In Russ.)

Zdorovennov R. E., Zimon O. V. Synoptic variability of currents in Lake Onega. *Vodnaya sreda Karelii: issledovanie, ispol'zovanie, okhrana: Mat-ly II Respubl. shkoly-konf. molodykh uchenykh (Petrozavodsk, 20–21 fevralya 2006 g.) = Aquatic environment of Karelia: research, use, and protection: proceedings of the II Republican school-conf. of young scientists (Petrozavodsk, Feb. 20-21, 2006)*. Petrozavodsk; 2006. P. 54–57. (In Russ.)

Zobkova M. V. Assessment of the autochthonous, allochthonous and anthropogenic components of organic matter in surface waters (on the example of water bodies in Karelia): Summary of PhD (Cand. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2024. 20 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 25.04.2025; принята к публикации / accepted: 23.10.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Коновалов Даниил Сергеевич

инженер-исследователь лаборатории гидробиологии
e-mail: konovalov.daniil1998@gmail.com

Сярки Мария Тагевна

канд. биол. наук, главный биолог группы исследований
донных отложений
e-mail: msyarki@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Konovalov, Daniil

Research Engineer

Syarki, Maria

Cand. Sci. (Biol.), Chief Biologist

УДК 502.13:504.5

ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ: СИТУАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

О. Н. Рублевская¹, Ю. Н. Бурвикова^{2*}, Т. В. Гусева², М. В. Бегак²

¹ ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» (ул. Кавалергардская, 42, Санкт-Петербург, Россия, 191015)

² Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» (Олимпийский пр., 42, Мытищи, Московская обл., Россия, 141006), *u.burvikova@eipc.center

Рассмотрены особенности эколого-технологической трансформации российской экономики, направленной на сокращение негативного воздействия на окружающую среду и повышение ресурсной эффективности производства. Проанализированы результаты, достигнутые предприятиями водоснабжения и водоотведения. Отмечено, что только в Российской Федерации такие предприятия отнесены к I категории негативного воздействия, что обязывает их внедрять наилучшие доступные технологии и получать комплексные экологические разрешения. Отрасль в инициативном порядке присоединилась к эколого-технологической трансформации; для предприятий водоснабжения и водоотведения разработан уникальный информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям и установлены технологические показатели (требования к составу очищенных вод), которые варьируют в зависимости от мощности очистных сооружений и категории принимающих водных объектов. Предприятия отрасли лидируют в сфере разработки и реализации программ эколого-технологической модернизации: доля комплексных экологических разрешений, выданных с условием выполнения таких программ, достигает 75 %. Проанализирован опыт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», очистные сооружения которого проходят последовательную реконструкцию, модернизацию и обеспечивают надлежащую очистку 99,8 % хозяйственно-бытовых сточных вод города. Отмечено, что ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и АО «ПКС-Водоканал» (г. Петрозаводск) стали первыми объектами негативного воздействия, которые были исключены из перечней региональных экологических «горячих точек» на основании решения международных организаций и соответствия требованиям наилучших доступных технологий. Сделан вывод, что результаты опытных испытаний отечественных приборов онлайн-контроля качества сточных вод, полученные ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» в части внедрения системы автоматического контроля очищенных вод, целесообразно использовать при ее внедрении на других объектах отрасли, учитывая их размер; такое решение позволит выполнить требования природоохранного законодательства, установленные в рамках перехода к эколого-технологическому регулированию ключевых отраслей экономики.

Ключевые слова: эколого-технологическая трансформация; очистка сточных вод; негативное воздействие на окружающую среду; наилучшие доступные технологии; технологический показатель; принимающий водный объект

Для цитирования: Рублевская О. Н., Бурвикова Ю. Н., Гусева Т. В., Бегак М. В. Особенности эколого-технологической трансформации предприятий водоснабжения и водоотведения: ситуационное исследование // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 106–118. doi: 10.17076/eco2189

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания научно-исследовательского института «Центр экологической промышленной политики» (020-00003-25-00).

**O. N. Rublevskaya¹, Yu. N. Burvikova^{2*}, T. V. Guseva², M. V. Begak².
SPECIFIC FEATURES OF THE ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL
TRANSFORMATION OF WATER SUPPLY AND WASTEWATER TREATMENT
PLANTS: A CASE STUDY**

¹ Saint Petersburg Vodokanal State Unitary Enterprise (42 Kavalergardskaya St., 191015 St. Petersburg, Russia)

² Environmental Industrial Policy Centre (42 Olimpijsky Ave., 141006 Mytishchi, Moscow Region, Russia), *u.burvikova@eipc.center

The article considers specific features of the environmental and technological transformation of the Russian economy aimed at reducing negative environmental impacts and enhancing the resource efficiency of production. We analyze the results achieved by water-supply and wastewater treatment enterprises. It is noteworthy that the Russian Federation is the only country where such enterprises are classified as belonging to category I of negative environmental impact, which obliges them to implement Best Available Techniques (BATs) and obtain Integrated Environmental Permits. The sector has joined the environmental and technological transformation on its own initiative and a unique BAT Reference Document has been developed for water supply and wastewater treatment enterprises. Technological indicators (or BAT-associated Emission Limits) (requirements for the composition of wastewater upon treatment) were established. They vary depending on the size of the treatment facilities and the category of the receiving water bodies. Enterprises of the sector are leaders in the development and implementation of environmental and technological modernization programs: 75 % of the Integrated Environmental Permits granted to enterprises involve the implementation of such programs. The article analyzes the experience of St. Petersburg Vodokanal (water supply and wastewater treatment enterprise), whose sewage treatment facilities are undergoing gradual reconstruction and modernization and ensure proper treatment of 99.8 % of the municipal wastewater. Saint Petersburg Vodokanal and Petrozavodsk Vodokanal became the first facilities with negative environmental impact to be excluded from the lists of regional environmental “hot spots” based on decisions of international organizations and compliance with BAT-associated requirements. We conclude that the experience of St. Petersburg Vodokanal in implementing a continuous self-monitoring system for treated wastewater should be replicated at other facilities, with adjustments for their size. Such a solution will enable fulfillment of the environmental legislation requirements established for the transition to environmental and technological regulation of key economic sectors.

Keywords: environmental and technological transformation; wastewater treatment; negative environment impact; Best Available Techniques; technological emission level; receiving water body

For citation: Rublevskaya O. N., Burvikova Yu. N., Guseva T. V., Begak M. V. Specific features of the environmental and technological transformation of water supply and wastewater treatment plants: a case study. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 106–118. doi: 10.17076/eco2189

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Environmental Industrial Policy Centre (020-00003-25-00).

Введение

Эколого-технологическая трансформация экономики – это процесс, начало которому было положено в 2014 г., когда вышло распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2014 г. № 398-р «Об утверждении комплекса мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий» [Распоряжение..., 2014]. Именно в этом документе подчеркивалась необходимость обеспечить последовательное снижение негативного воздействия крупных предприятий ключевых отраслей экономики на окружающую среду путем практического применения наилучших доступных технологий (НДТ). Принятию такого решения предшествовали масштабные исследования в области промышленной экологии, которые советские ученые вели в 1970-х годах XX в. [Скобелев, 2020]. Словно отражая суть промышленной экологии (науки о взаимодействии промышленных объектов с окружающей средой (точнее – предприятий в целом)), переход к эколого-технологическому регулированию деятельности осуществляется при активном участии природоохранных органов (Министерства природных ресурсов и экологии РФ и Росприроднадзора) и Министерства промышленности и торговли РФ; участвуют в проведении реформы и другие ведомства. При этом наилучшие доступные технологии представляют собой ядро экологической промышленной политики [Никитин и др., 2017; Мантуров, 2018], результаты реализации которой на протяжении 10 лет свидетельствуют о том, что отказ от устаревших технологий и внедрение НДТ в различных отраслях экономики позволяют повысить ресурсную и экологическую эффективность производства и сократить негативное воздействие на окружающую среду (НВОС).

В представленной работе проанализированы основные результаты эколого-технологической трансформации предприятий водоснабжения и водоотведения, внедряющих наилучшие доступные технологии и добивающихся соответствия новым отраслевым требованиям.

Методы и подходы

При подготовке статьи нашли применение характерные для междисциплинарных исследований методы анализа и синтеза, контент-анализа, обобщения [Колмогоров и др., 2017]. Авторы использовали информацию базы данных Бюро наилучших доступных технологий, функции которого выполняет Научно-исследовательский институт «Центр экологической

промышленной политики», а также сведения о проектах, реализуемых ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», в том числе опубликованные в открытой печати [Кармазинов, 2009; Волков и др., 2020].

Результаты и обсуждение

Предприятия водоснабжения и водоотведения как объекты эколого-технологического регулирования

Предприятия, предоставляющие услуги по водоснабжению, водоотведению, а также очистке сточных вод поселений и городских округов, исторически называют водоканалами [Водоснабжение..., 2008; Кармазинов, 2009]. Они играют уникальную социально-экологическую роль и отличаются от всех иных объектов так называемой I категории НВОС, которые представляют собой крупные промышленные (добывающие полезные ископаемые и перерабатывающие их) или сельскохозяйственные предприятия. Каждое предприятие характеризуется перечнем производимой продукции и технологических процессов, обеспечивающих выпуск такой продукции. В ходе своей основной деятельности предприятия потребляют ресурсы (сырье, материалы, энергию, воду и др.) и оказывают воздействие на окружающую среду, природные и социально-экономические системы, прежде всего – расположенные в непосредственной близости от производственных площадок.

В части очистки сточных вод «продукцию» водоканалов представляет собой очищенная сточная вода, поступающая в принимающие природные водные объекты. Вопреки бытующему мнению, водоканалы не могут быть загрязнителями; напротив, их отсутствие привело бы как к деградации водных систем, так и к снижению качества жизни населения. Тем не менее водоканалы относятся к предприятиям I категории НВОС; более того, эта отрасль добровольно включилась в контур эколого-технологического регулирования, стремясь получить технологически обоснованные обязательные для соблюдения показатели очистки сточных вод. Поэтому в рамках действующего природоохранного законодательства практически все водоканалы обязаны получать комплексные экологические разрешения (КЭР), разрабатываемые на основе концепции НДТ [Данилович и др., 2020].

Нормирование, используемое при выдаче КЭР, основано прежде всего на установлении требований к веществам или соединениям, наиболее характерным для технологических

процессов конкретных предприятий, так называемым маркерным веществам. Когда речь идет о присутствии таких веществ в принимающих водных объектах, используются два термина – «маркерные» (преимущественно в России) [Гусева и др., 2001; Астраханов и др., 2023] и «индикаторные» (чаще – в зарубежных источниках) [Syeed et al., 2023]. В контексте НДТ маркерные вещества могут относиться к сырьевым потокам, основным или вспомогательным технологиям, но непременно должны быть значимы и характерны для применяемых производственных процессов. Для маркерных веществ устанавливаются технологические показатели (ТП) НДТ, которые в международной практике имеют расширенное название – основанные на НДТ уровни эмиссий (Best Available Technique-Associated Emission Level, BAT-AEL) [Polders et al., 2012].

Нормирование именно маркерных веществ (как технологически обусловленных) – один из основных принципов НДТ; перечень таких веществ (и интегральных показателей) невелик. Во-первых, замысел был в том, чтобы обеспечить возможность применения систем автоматического контроля выбросов и сбросов по таким показателям, ведь далеко не каждое соединение может быть количественно определено автоматическими методами с требуемой допустимой погрешностью [Информационно-технический..., 2021]. Во-вторых, нормирование широкого перечня веществ (в том числе присутствующих в составе выбросов и (или) сбросов в малых количествах) приводит к избыточной нагрузке на предприятия; более того, поступление в окружающую среду ряда веществ, которые были «традиционными» в прошлой системе нормирования, связано не с основными процессами производства, а, например, с деятельностью гаражей, ремонтных подразделений и пр. [Tikhonova et al., 2021].

Из достаточно большого перечня веществ, традиционно определяемых водоканалами в очищенной сточной воде в ходе инвентаризации при проведении производственного экологического контроля, было выбрано семь показателей, которые технологически специфичны для отрасли и наиболее полно характеризуют уровень очистки; этот перечень включает и интегральные показатели (химическое и биохимическое потребление кислорода – ХПК и БПК₅ соответственно).

Все сведения о технологических процессах и технологических показателях НДТ систематизированы в отраслевом Информационно-техническом справочнике (ИТС) по НДТ – ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений,

городских округов» [2019]. В подготовке ИТС активное участие принимали сотрудники водоканалов, осуществлявшие инициативные проекты еще в начале 2000-х годов, в том числе посвященные выполнению международных экологических обязательств Российской Федерации. Речь идет о водоканалах Санкт-Петербурга, Петрозаводска и Калининграда, обеспечивающих очистку сточных вод в соответствии с требованиями ХЕЛКОМ [Скобелев и др., 2020].

Работа над формированием перечня маркерных веществ и последующим установлением ТП представляет собой сложный многостадийный процесс, в котором принимают участие представители отрасли, научного сообщества, органов государственной власти и общественных организаций. В 2019 г. анкеты заполнили около 200 водоканалов; поступившие от предприятий сведения были обезличены и сопоставлены между собой с учетом производительности очистных сооружений и категорий принимающих водных объектов. Для установления ТП разработана матрица, представленная в таблице. Она включает восемь категорий мощности: от сверхмалых очистных сооружений (с объемом сброса очищенных сточных вод от 10 до 100 м³/сут.) до сверхкрупных (с объемом сброса, превышающим 600 000 м³/сут.), а также четыре категории водных объектов (А, Б, В и Г), привязанные к бассейнам морей. В категорию А выделены особо охраняемые природные территории (ООПТ) и акватории, например озеро Байкал и его притоки, расположенные в пределах ООПТ. При сбросе очищенных сточных вод в водные объекты категории А применяются самые жесткие требования, водоканалам рекомендуется дополнительно устанавливать системы глубокой доочистки, которые для других объектов считаются избыточными.

Одно из требований к предприятиям всех отраслей (областей применения НДТ) для получения КЭР – обеспечение соответствия технологическим показателям. При этом ТП обычно устанавливаются с таким расчетом, чтобы примерно 10–15 % предприятий отрасли были вынуждены пройти модернизацию производства [Скобелев, 2020]. Такие предприятия разрабатывают специальные программы повышения экологической эффективности (ППЭЭ). По мере актуализации ИТС технологические показатели ужесточаются, и весь процесс эколого-технологической модернизации экономики соответствует принципу последовательного отказа от устаревших технологий, последовательного улучшения достигнутых показателей [Скобелев, 2020].

Технологические показатели для очистных сооружений централизованных систем водоотведения поселений или городских округов, предназначенных для очистки смешанных (городских) сточных вод [Постановление..., 2020]

Technological indicators for wastewater treatment facilities of settlements or urban districts designed for treating municipal (urban) wastewater [Decree..., 2020]

Категории водоканалов по мощности Categories of wastewater treatment plants by capacity	Технологические показатели (среднегодовые значения концентрации загрязняющих веществ в смешанных (городских) сточных водах, сбрасываемых в водные объекты, не более, мг/дм ³) Technological indicators (average annual values of concentration of pollutants in mixed (municipal) wastewater discharged into water bodies, no more than mg/dm ³)						
	Взвешенные вещества Suspended solids	ХПК COD	БПК ₅ BOD ₅	Азот аммонийный N (ammonia)	Азот нитратов N (nitrates)	Азот нитритов N (nitrites)	Фосфор фосфатов P (phosphates)
I. При сбросе в водный объект (часть водного объекта) категории А I. Discharged into a Category A water body (part of a water body)							
Большие – Крупные – Крупнейшие – Сверхкрупные очистные сооружения Large – Larger – The largest – Super-large wastewater treatment plants	5	40	3	1	9	0,1	0,5
Сверхмалые – Малые – Небольшие – Средние очистные сооружения Ultra-small – Small – Moderate-sized – Medium-sized wastewater treatment plants	10	40	5	1	9	0,1	0,7
II. При сбросе в водный объект (часть водного объекта) категории Б II. Discharged into a Category Б water body (part of a water body)							
Большие – Крупные – Крупнейшие – Сверхкрупные очистные сооружения Large – Larger – The largest – Super-large wastewater treatment plants	10	80	8	1	9	0,1	0,7
Малые – Небольшие – Средние очистные сооружения Small – Moderate-sized – Medium-sized wastewater treatment plants	15	80	10	1,5	12	0,25	1 (1,5)
Сверхмалые очистные сооружения Ultra-small wastewater treatment plants	15	80	12	8	18	0,25	5
III. При сбросе в водный объект (часть водного объекта) категории В III. Discharged into a Category В water body (part of a water body)							
Большие – Крупные – Крупнейшие – Сверхкрупные очистные сооружения Large – Larger – The largest – Super-large wastewater treatment plants	10	80	8	1	9	0,1	1
Средние очистные сооружения Medium-sized wastewater treatment plants	15	80	12	2	9	0,15	5
Сверхмалые – Малые – Небольшие очистные сооружения Ultra-small – Small – Moderate-sized treatment facilities	15	80	12	8	18	0,25	5
IV. При сбросе в водный объект (часть водного объекта) категории Г IV. Discharged into a Category Г water body (part of a water body)							
Большие – Крупные – Крупнейшие – Сверхкрупные очистные сооружения Large – Larger – The largest – Super-large wastewater treatment plants	15	80	10	2	9	0,2	5
Сверхмалые – Малые – Небольшие – Средние очистные сооружения Ultra-small – Small – Moderate-sized – Medium-sized wastewater treatment plants	15	80	12	8 (20)	18	0,25	5

Отрасль водоснабжения и водоотведения составляет редкое исключение: более 60 % предприятий при получении комплексных экологических разрешений разрабатывают, а затем реализуют программы модернизации (ППЭЭ), добиваясь лучших технологических показателей. Это решение далось непросто: реконструкцию должны пройти примерно две трети очистных сооружений, при этом большинство продолжают работать, многие – расширяются, но такой

подход оправдан значимостью задачи сокращения негативного воздействия на поверхностные водные объекты. Отрасль лидирует в части разработки и реализации ППЭЭ (рис. 1).

На рис. 2 представлена динамика одобрения проектов ППЭЭ и получения КЭР российскими водоканалами. По состоянию на 30.07.2025 г. предприятиям водоснабжения и водоотведения выдано 139 КЭР; Межведомственная комиссия одобрила 137 проектов ППЭЭ.

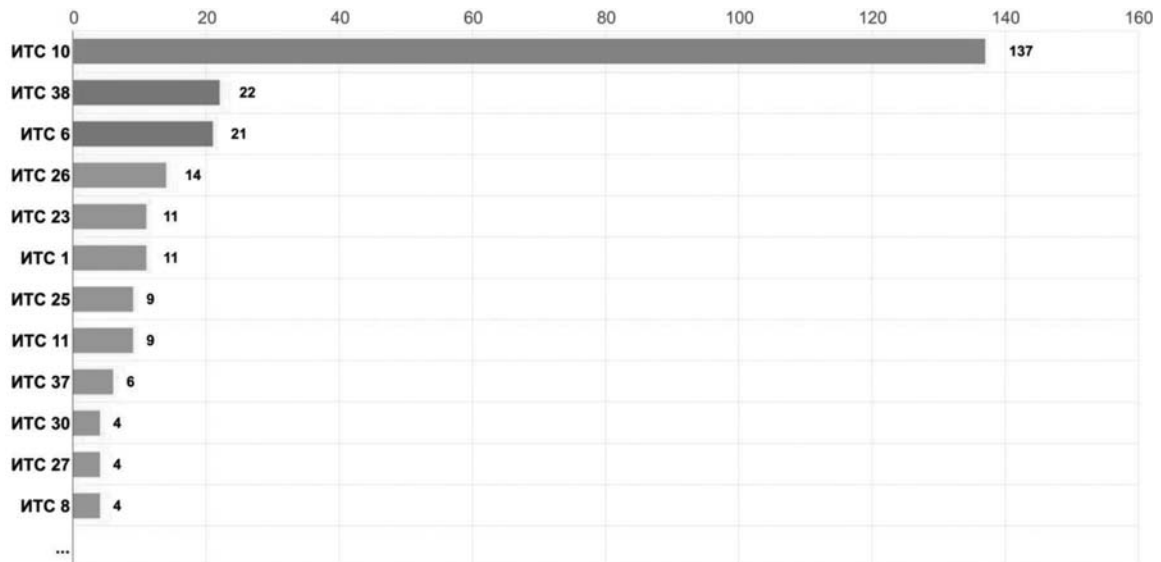


Рис. 1. Количество программ повышения экологической эффективности, разработанных для достижения соответствия требованиям отраслевых технологических показателей

Fig. 1. Number of Environmental Performance Enhancement Programs developed to achieve sectoral BAT-associated Emission Levels

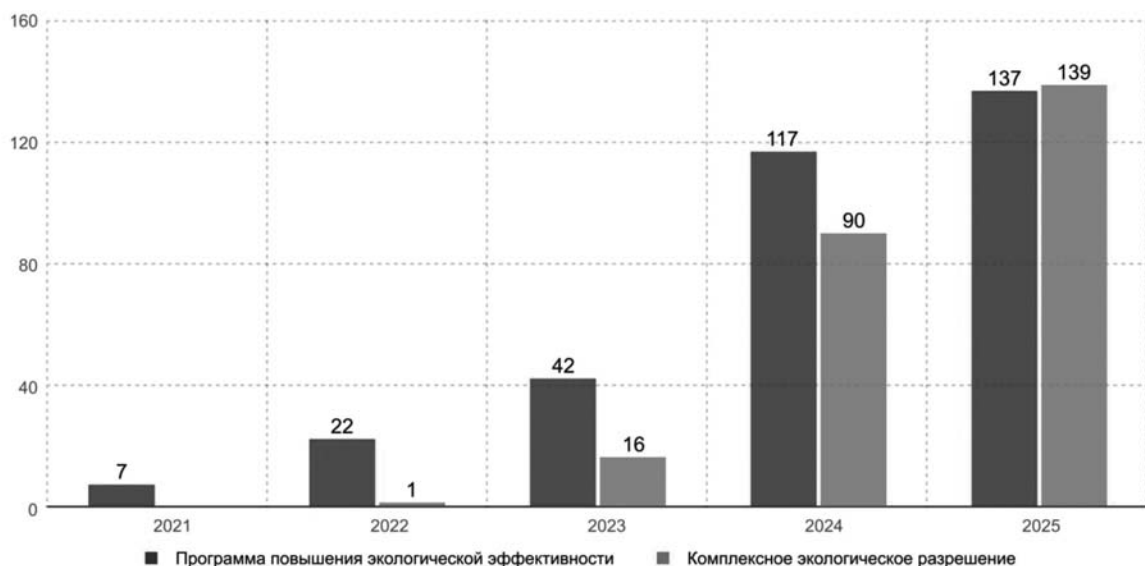


Рис. 2. Количество одобренных проектов программ повышения экологической эффективности и выданных комплексных экологических разрешений предприятий отрасли очистки коммунально-бытовых сточных вод по состоянию на 30.07.2025 г.

Fig. 2. Number of approved Environmental Performance Enhancement Programs and Integrated Environmental Permits granted to wastewater treatment plants as on July 30, 2025

В приведенной статистике не учтены пересмотры проектов ППЭЭ, хотя для многих предприятий это оказалось существенной проблемой, ведь модернизация требует длительного времени (на реализацию проекта законодательно разрешено потратить семь лет, и продлению этот срок не подлежит). При этом в 2020–2025 гг. многие водоканалы столкнулись с рядом проблем и риском невыполнения в установленный срок мероприятий ППЭЭ. Во-первых, многими проектами изначально было предусмотрено использование импортного оборудования, поставки которого с учетом сложившейся геополитической обстановки прекращены, поэтому потребовалась корректировка проектов, поиск аналогов оборудования. Во-вторых, для организаций, у которых в эксплуатации более двух объектов I категории НВОС, технически невозможно одновременно выполнять работы по реконструкции без риска сброса неочищенных сточных вод в водные объекты.

Из 139 выданных водоканалам КЭР 105 включают программы повышения экологической эффективности, что составляет 75,5 % от всех предприятий отрасли, получивших КЭР. По завершении эколого-технологической модернизации водоканалов состав очищенных сточных вод должен будет соответствовать НДТ по всем показателям.

В качестве примера реализации принципа отказа от устаревших технологий и последовательного достижения лучших показателей экологической эффективности рассмотрим ситуационное исследование, выполненное применительно к Юго-Западным очистным сооружениям ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», где пилотные проекты по переходу к НДТ осуществляются с начала 2000-х годов.

Анализ опыта эколого-технологической модернизации Юго-Западных очистных сооружений ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

Юго-Западные очистные сооружения (ЮЗОС) относятся к крупнейшим, их проектная производительность составляет 330 тыс. м³/сут; принимающий водный объект – Невская губа Финского залива, которая относится к категории Б (см. табл.).

Однако в 1992 г. государства, имеющие выход к Балтийскому морю, подписали Хельсинкскую конвенцию (ХЕЛКОМ), основная цель которой – «сохранение и восстановление экологического баланса Балтийского моря как крупной природной экосистемы, а также

обеспечение рационального подхода к использованию его ресурсов» [Хельсинкская...]. ХЕЛКОМ можно рассматривать как одно из первых проявлений создания концепции «синей экономики», основоположником которой считается Гюнтер Паули, представивший в 2009 г. (через 17 лет после подписания Хельсинкской конвенции) соответствующий доклад Римскому клубу [Hanslik, Uhl, 2012].

Для восстановления экосистемы Балтийского моря все страны-участницы Конвенции должны принимать меры, направленные на контроль и предотвращение загрязнения окружающей среды. Рекомендации ХЕЛКОМ включают позицию 28E/5 «Очистка городских сточных вод», согласно которой водоканалы должны обеспечивать достижение следующих показателей очистки сточных вод:

- азот общий – не более 10 мг/дм³;
- фосфор общий – не более 0,5 мг/дм³.

Наша страна присоединилась к Конвенции в 1998 г., и для очистных сооружений Водоканала Санкт-Петербурга (равно как и Калининграда) условия ХЕЛКОМ стали обязательными. Вспомним, что это случилось до перехода к эколого-технологическому регулированию предприятий водоснабжения и водоотведения Российской Федерации. При этом в других странах подобные объекты вовсе не регулируются на основе концепции НДТ. Проект создания ЮЗОС, при реализации которого использованы самые совершенные технологии, завершен в 2005 г.; это позволило обеспечить соблюдение условий Конвенции. Однако по прошествии 20 лет сооружения требуют модернизации.

Канализование Санкт-Петербурга в основном осуществляется по общесплавной схеме, которая предусматривает совместное поступление в систему бытовых, промышленных, а также поверхностных (дождевых, талых) сточных вод.

ЮЗОС занимают площадь 40 га, а бассейн канализования включает юго-западную часть города Санкт-Петербурга, в том числе г. Красное Село, пос. Горелово, пос. Володарский, жилые зоны Кировского завода и завода ЛЭМЗ, жилые районы Сосновой Поляны, Улянки, Дачного, части Петродворцового, Кировского и Красносельского районов. Население в бассейне канализования ЮЗОС составляет более 770 тыс. человек. Как и для всех других предприятий отрасли, исходным «сырьем» являются сточные воды, направляемые на очистку, а «продукцией» – очищенная вода, направляемая в принимающий водный объект. Обработка осадка, образующегося в процессе очистки

сточных вод, происходит на заводе по сжиганию избыточного ила.

В это трудно поверить, но до 1978 г. в Ленинграде не было очистных сооружений канализации и сточные воды напрямую поступали в р. Неву и Финский залив [Волков и др., 2020]. Центральная станция аэрации, обеспечившая очистку 27 % всех сточных вод города, была открыта в 1978 г.; к 2000 г. очистку проходили уже 75 % сточных вод. Введение в 2005 г. в эксплуатацию ЮЗОС позволило очищать уже 85 % городских сточных вод.

В 2012 г. Водоканал Санкт-Петербурга был исключен из перечня так называемых экологических «горячих точек» ХЕЛКОМ на основании сложной административной процедуры, включавшей не только оценку степени очистки сточных вод города на всех сооружениях, но и длительную переписку профильных министерств и ведомств стран-участниц Хельсинкской конвенции [Волков и др., 2020]. Несколько позднее процедура исключения «горячих точек» была модифицирована; российские эксперты предложили в качестве критериев использовать требования НДТ, которые установлены в Российской Федерации [Скобелев, Микаэльссон, 2020]. Такую же процедуру прошли Сыктывкарский ЛПК (целлюлозно-бумажный комбинат) и Водоканал г. Петрозаводска [Гревцов и др., 2020]. Водоканал продолжал развиваться, вводились новые мощности, осуществлялась модернизация действующих очистных сооружений, и к 2020 г. уже 99,8 % сточных вод проходят очистку на сооружениях ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

Очистные сооружения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» построены на принципе

биологической очистки сточной воды и включают основные процессы очистки: механическую, биологическую и химическую. В блоке обработки осадка сточных вод проводятся процессы уплотнения избыточного ила, обезвоживания смеси сырого осадка и уплотненного ила с дальнейшим термическим обезвреживанием. На стадии биологической очистки ЮЗОС использован модифицированный процесс Кейптаунского университета [Vaioroulou, Aivasidis, 2008; Mikhailiova et al., 2014] (рис. 3). Процесс модифицирован с учетом обеспечения глубокого биологического удаления фосфора из обедненных по органическим соединениям сточных вод (характерных для общесплавных систем канализования) с невысоким соотношением БПК₅ к Р_{общ.} на входе в аэротенк (19–20 при норме 25 и более).

Аэротенки разделены на анаэробную, аноксидную, переходную аноксидно/оксидную и оксидную зоны.

На ЮЗОС приняты все технологически доступные меры для обеспечения глубокого удаления фосфора и азота до значений концентраций в очищенном стоке на уровне требований НДТ и рекомендаций ХЕЛКОМ:

- внутренние рециклы, регулируя которые, возможно достигать требуемой глубины очистки;
- мероприятия по обогащению стоков органикой: ацидофикация сырого осадка, возврат в поступающий сток отжима от отбросов с решеток;
- химическое осаждение фосфора фосфатов, что позволяет оптимизировать распределение нагрузки между процессами денитрификации и дефосфотации.

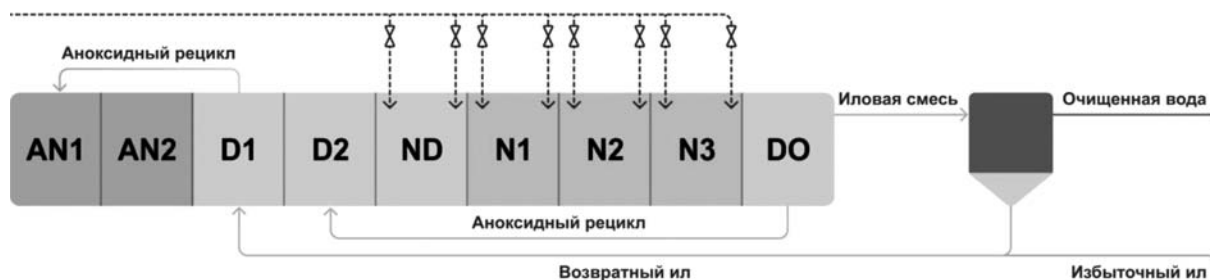


Рис. 3. Технология модифицированного процесса Кейптаунского университета, внедренная на Юго-Западных очистных сооружениях. AN1, AN2 – анаэробные зоны, D1, D2 – зоны денитрификации, ND – переходная зона денитрификации и нитрификации, N1, N2, N3 – зоны нитрификации, DO – зона без аэрации

Fig. 3. Modified Cape Town University technology for the biological removal of nitrogen and phosphorus implemented at the South-West Wastewater Treatment Plant. AN1, AN2 – anaerobic zones, D1, D2 – denitrification zones, ND – denitrification / nitrification transition zone, N1, N2, N3 – nitrification zones, DO – zone without aeration

Для контроля качества очищенных сточных вод в системе биомониторинга используются раки: в теплое время года – австралийские красноклешневые, в холодное – аборигенные узкопалые.

Учитывая требование оснащения системами автоматического контроля (САК) основных стационарных источников выбросов и сбросов загрязняющих веществ [Постановление..., 2020], специалисты ЮЗОС проводят пилотные испытания отечественных приборов непрерывного контроля, обеспечивающих измерение следующих показателей: взвешенные вещества, нитрат-ион, аммоний-ион и фосфор фосфатов. В ближайшее время планируется провести тестирование системы передачи данных в управление Росприроднадзора, что также соответствует требованиям законодательства.

За прошедшие годы очистные сооружения Санкт-Петербурга подверглись глубокой технологической модернизации, но для достижения стабильных требуемых значений технологических показателей необходима практически постоянная работа. Сейчас на ЮЗОС реализуются мероприятия программы повышения экологической эффективности, включающие реконструкцию отдельных секций аэротенков, системы транспортировки возвратного ила, а также внедрение сооружений доочистки и систем автоматического контроля сбросов очищенных сточных вод.

В результате проведенной изыскательской работы специалистами ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» установлено, что системы автоматического контроля сбросов могут выполняться в двух основных модификациях: погружные зонды, укомплектованные набором датчиков, и анализаторы, требующие отбора проб. Погружные зонды удобны возможностью размещения нескольких датчиков в одном интегрированном модуле, а также широкой вариативностью размещения оборудования, в том числе на буйках. Однако подобные системы в настоящее время труднодоступны на территории России.

Большинство отечественных производителей размещают анализаторы в специально оборудованных помещениях (постах) или внутри производственных помещений, что позволяет обеспечить требуемые для бесперебойной работы оборудования условия, а также использовать методы реагентного анализа (в том числе с применением водных растворов). Самыми распространенными являются потенциометрические анализаторы, которые используются для количественного анализа группы азота, фосфора, а также кальция, магния, хлоридов. Применение реагентных методов

позволяет снизить погрешность измерений. Расположение в отапливаемых помещениях делает системы удобными для обслуживания, а для обеспечения метрологической составляющей (поверка, калибровка и т. п.) можно использовать обычные для лабораторной практики государственные стандартные образцы.

Применяются также и фотометрические датчики. Подобные системы позволяют определить не только показатели цветности, но и массовые концентрации ряда компонентов, таких как ионы железа, марганца (II) или хрома (VI). Для нужд водоканалов потенциометрические датчики применимы при определении массовой концентрации нитратов, нитритов и фосфатов, относящихся к технологическим показателям НДТ (см. табл.). На ЮЗОС используется оборудование отечественных производителей, внесенное в Государственный реестр средств измерений (ФГИС «Аршин»). Результаты, полученные на ЮЗОС, целесообразно тиражировать, так как все водоканалы обязаны установить САК в течение четырех лет после получения КЭР (хотя перечень анализируемых показателей зависит от производительности очистных сооружений [Постановление..., 2020]).

Однако водоканал Санкт-Петербурга пошел дальше, и в настоящее время в целях обеспечения безопасного водоснабжения города река Нева оснащена автоматическими датчиками контроля качества воды, позволяющими отслеживать ключевые показатели от истока до водозаборов предприятия. Это особенно важно, учитывая, что 98 % питьевой воды забирается из поверхностного источника – р. Невы. Система мониторинга на всем протяжении реки позволяет ускорить реагирование на возможные изменения в источнике и оперативно принять необходимые меры. Таким образом, замыкается круговорот воды как продукта, реализованный с помощью природоподобных технологий, а именно двух основных стадий: водоснабжения и водоотведения.

В соответствии с принципом последовательного улучшения систем менеджмента (в данном случае – очистки сточных вод) на ЮЗОС в рамках ППЭЭ планируется внедрение системы доочистки, которая позволит минимизировать количество взвеси в очищенных водах, а также повысит эффективность процесса обеззараживания ультрафиолетовым методом [Головкова, 2020]. Такой подход позволит стабильно обеспечивать требуемое качество очистки по технологически нормируемым показателям, что особенно актуально при общесплавной системе канализования,

для которой характерна неравномерность гидравлических нагрузок. Также доочистка позволит стабилизировать качество сточных вод по микробиологическим показателям и оптимизировать затраты на процесс обеззараживания.

В настоящий момент на ЮЗОС ведутся тестовые испытания отечественных технологических решений по доочистке сточных вод. По результатам испытаний будет разработано технико-экономическое обоснование и выбран наиболее оптимальный способ доочистки.

Заключение

Эколого-технологическая трансформация экономики осуществляется в Российской Федерации на основе концепции наилучших доступных технологий, представляющих собой совокупность технологических, технических и организационных решений, позволяющих предприятиям добиваться высокой экологической и ресурсной эффективности экономически целесообразными методами [Скобелев, 2020]. К областям применения НДТ отнесены ключевые отрасли промышленности и сельского хозяйства. При этом Россия является единственной страной, в которой предприятия водоснабжения и водоотведения обязаны внедрять НДТ и получать комплексные экологические разрешения.

Требования наилучших доступных технологий для водоканалов систематизированы в информационно-техническом справочнике ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов». Этот документ используют для подготовки заявок на комплексные экологические разрешения и для разработки проектов программ повышения экологической эффективности сотни предприятий водоснабжения и водоотведения. Технологические показатели НДТ являются достаточно жесткими, и более 75 % водоканалов уже реализуют ППЭЭ, стремясь обеспечить соблюдение требований наилучших доступных технологий.

Опыт ГУП «Водоканал Санкт-Петербург» показывает, что применение принципов НДТ для последовательной эколого-технологической трансформации позволяет не только сократить негативное воздействие на окружающую среду, но и добиться выполнения международных обязательств Российской Федерации. В настоящее время водоканал обеспечивает очистку 99,8 % хозяйственно-бытовых сточных вод Санкт-Петербурга, проводит апробацию системы автоматического контроля загрязняющих веществ и готовится к участию в актуализации

ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» и ИТС 22.1 «Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологического обеспечения».

Литература

Астраханов М. Е., Бурвикова Ю. Н., Новиков В. А. Технологическое нормирование сбросов сточных вод на основе показателей НДТ // Компетентность. 2023. № 4. С. 34–39. doi: 10.24412/1993-8780-2023-4-34-39

Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге / Под ред. Ф. В. Кармазинова. СПб.: Новый журнал, 2008. 464 с.

Волков С. Н., Рублевская О. Н., Тихонова И. О., Гусева Т. В., Иикканен М. Опыт развития объектов водоотведения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»: этапы перехода к наилучшим доступным технологиям // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 6. С. 104–120. doi: 10.35567/1999-4508-2020-6-6

Головкова Ю. С. Обеззараживание сточных вод ультрафиолетовыми лучами // Academy. 2020. № 3(54). С. 21–22.

Гревцов О. В., Щелчков К. А., Эпов А. Н., Остапчук В. В., Чижиков И. П. Применение принципов НДТ в качестве инструмента выполнения международных обязательств Российской Федерации: практический опыт исключения КОС из списка экологических «горячих точек» Баренцева Евро-Арктического региона // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и очистки сточных вод. 2020. № 3. С. 2–7.

Гусева Т. В., Веницианов Е. В., Молчанова Я. П. Маркерные показатели в оценке состояния водных объектов при малой антропогенной нагрузке (на примере р. Пры) // Водные ресурсы. 2001. Т. 28, № 3. С. 342–349.

Данилович Д. А., Будницкий Д. М., Новиков А. В. Переход на технологическое нормирование сбросов городских очистных сооружений: итоги десяти лет работы и рекомендации после принятия полного пакета нормативных правовых актов // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 11. С. 4–15.

Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов». М.: Бюро НДТ, 2019. 416 с.

Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 22.1-2021 «Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологического обеспечения». М.: Бюро НДТ, 2021. 172 с.

Кармазинов Ф. В. Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций и Водоканал Санкт-Петербурга на службе великого города // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2009. Вып. 1. С. 22–27.

Колмогоров Ю. Н., Сергеев А. П., Тарасов Д. А., Арапова С. П. Методы и средства научных исследований. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 152 с.

Мантуров Д. В. Устойчивый экономический рост: аспекты гармонизации промышленной и экологической политики России // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2018. Т. 11, № 4. С. 132–140. doi: 10.18721/JE.11410

Никитин Г. С., Осьмаков В. С., Скобелев Д. О. Согласование экологической и промышленной политики: глобальные индикаторы // Компетентность. 2017. № 7(148). С. 20–28.

Постановление Правительства Российской Федерации от 13.03.2019 г. № 262 «Об утверждении Правил создания и эксплуатации системы автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ».

Постановление Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 г. № 1430 «Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов».

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2014 г. № 398-р «Об утверждении комплекса мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий».

Скобелев Д. О. Промышленная политика повышения ресурсоэффективности и достижение целей устойчивого развития // Journal of New Economy. 2020. Т. 21, № 4. С. 153–173. doi: 10.29141/2658-5081-2020-21-4-8

Скобелев Д. О., Микаэльссон О. Наилучшие доступные технологии как критерии исключения российских промышленных предприятий из списка экологических «горячих точек» Баренцева Евро-Арктического региона // Экономика устойчивого развития. 2020. № 2(42). С. 179–185.

Скобелев Д. О., Микаэльссон О., Бхимани Ш. Наилучшие доступные технологии в условиях международных соглашений // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12, № 5. doi: 10.15862/20ECVN520

Хельсинкская комиссия по защите морской среды Балтийского моря. URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/10/Baltic-Sea-Action-Plan-2021-update.pdf> (дата обращения: 05.06.2025).

Hanslik O., Uhl A. Blue economy innovations for a new level of competition // 360° The Business Transformation Journal. 2012. Vol. 2012. P. 11–27.

Mikhailova Y., Kevbrina M., Grachev V., Nikolaev Yu. Increase of nitrification efficiency at waste water treatment by implementation of bioaugmentation process // Water Pract. Technol. 2014. Vol. 9(4). Art. 551. doi: 10.2166/wpt.2014.061

Polders C., Van den Abeele L., Derden A., Huybrechts D. Methodology for determining emission levels associated with the best available techniques for industrial waste water // J. Clean. Prod. 2012. Vol. 29–30. P. 113–121. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.02.008

Syed M. M., Hossain M. S., Karim M. R., Uddin M. F., Hasan M., Khan R. H. Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: a critical review // Environ. Sustain. Ind. 2023. Vol. 18. Art. 100247. doi: 10.1016/j.indic.2023.100247

Tikhonova I. O., Guseva T. V., Shchelchikov K. A., Potapova E. N., Averochkin E. M. Best available techniques, general binding rules and decarbonisation of the construction materials industry // Proc. 21st International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2021. 2021. Iss. 5.1. P. 51–58. doi: 10.5593/sgem2021/5.1/s20.007

Vaiopoulou E., Aivasidis A. A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance // Chemosphere. 2008. Vol. 72, iss. 7. P. 1062–1068. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.04.044

References

Astrakhanov M. E., Burvikova Yu. N., Novikov V. A. Technological regulation of wastewater discharges based on the best available techniques parameters. *Kompetentnost' = Competency*. 2023;4:34–39. (In Russ.). doi: 10.24412/1993-8780-2023-4-34-39

Danilovich D. A., Budnitskii D. M., Novikov A. V. Transition to technological norms setting for urban wastewater treatment plants: results of the ten-year work and recommendations after the adoption of a complete package of regulatory legal acts. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2020;11:4–15. (In Russ.)

Decree of the Government of the Russian Federation dated 03/13/2019 No. 262 *On approval of the Rules for the creation and operation of an automatic control system for emissions of pollutants and (or) discharges of pollutants*. (In Russ.)

Decree of the Government of the Russian Federation dated 09/15/2020 No. 1430 *On approval of technological indicators of the best available technologies in the field of wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems in settlements or urban districts*. (In Russ.)

Directive of the Government of the Russian Federation dated 03/19/2014 No. 398-r *On approval of a set of measures aimed at eliminating the use of outdated and inefficient technologies*. (In Russ.)

Golovkova Yu. S. Disinfecting water by ultraviolet rays. *Academy*. 2020;3(54):21–22. (In Russ.)

Grevtsov O. V., Shchelchikov K. A., Epov A. N., Ostapchuk V. V., Chizhikov I. P. Implementing BAT principles as a tool for fulfilling international obligations of the Russian Federation: practical experience in excluding Russian industries from the list of environmental “hot spots” of the Barents Euro-Arctic region. *Naилучshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i ochistki stochnykh vod = Best Available Technologies for Water Supply and Wastewater Treatment*. 2020;3:2–7. (In Russ.)

Guseva T. V., Venitsianov E. V., Molchanova Ya. P. Marker parameters in assessing the state of water bodies under the low anthropogenic load (on the example

of the Pra River). *Vodnye resursy = Water Resources*. 2001;28(3):342–349. (In Russ.)

Hanslik O., Uhl A. Blue economy innovations for a new level of competition. *360° The Business Transformation Journal*. 2012;2012:11–27. URL: <http://hdl.handle.net/11654/9512> (accessed: 06.05.2025).

Helsinki Commission for the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea. URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/10/Baltic-Sea-Action-Plan-2021-update.pdf> (accessed: 06.05.2025).

Karmazinov F. V. St. Petersburg State University of Water Communications and the St. Petersburg Water Utility in the service of the great city. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova = Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2009;1:22–27. (In Russ.)

Karmazinov F. V. (ed.). Water supply and wastewater treatment in St. Petersburg. St. Petersburg: Novyi zhurnal; 2008. 464 p. (In Russ.)

Kolmogorov Yu. N., Sergeev A. P., Tarasov D. A., Arapova S. P. Methods and means of scientific research. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta; 2017. 152 p. (In Russ.)

Manturov D. V. Sustainable economic growth: aspects of the harmonization of industrial and environmental policy in Russia. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheski nauki = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2018;11(4):132–140. (In Russ.). doi: 10.18721/JE.11410

Mikhailova Y., Kevbrina M., Grachev V., Nikolaev Yu. Increase of nitrification efficiency at waste water treatment by implementation of bioaugmentation process. *Water Pract. Technol.* 2014;9(4):551. doi: 10.2166/wpt.2014.061

Nikitin G. S., Osmakov V. S., Skobelev D. O. Coordination of environmental and industrial policy: global indicators. *Kompetentnost' = Competency*. 2017;7(148):20–28. (In Russ.)

Polders C., Van den Abeele L., Derden A., Huybrechts D. Methodology for determining emission levels associated with the best available techniques for industrial waste water. *J. Clean. Prod.* 2012;29-30:113–121. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.02.008

Reference document on best available techniques ITS 10-2019 *Wastewater treatment using centralized*

wastewater disposal systems in settlements and urban districts. Moscow: Byuro NDT; 2019. 416 p. (In Russ.)

Reference Document on best available techniques ITS 22.1-2021 *General principles of industrial environmental control and its metrological support*. Moscow: Byuro NDT; 2021. 172 p. (In Russ.)

Skobelev D. O. Industrial policy of increasing resource efficiency and the achievement of the sustainable development goals. *Journal of New Economics*. 2020;21(4):153–173. (In Russ.). doi: 10.29141/2658-5081-2020-21-4-8

Skobelev D. O., Mikaelsson O. Best available techniques as criteria for excluding Russian industrial installations from the list of environmental “hot spots” of the Barents Euro-Arctic region. *Ekonomika ustoychivogo razvitiya = Economics of Sustainable Development*. 2020;2(42):179–185. (In Russ.)

Skobelev D. O., Mikaelsson O., Bhimani Sh. Best available techniques as a tool for compliance with international agreements. *Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2020;12(5):1–17. (In Russ.). doi: 10.15862/20ECVN520

Syed M. M., Hossain M. S., Karim M. R., Uddin M. F., Hasan M., Khan R. H. Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: a critical review. *Environ. Sustain. Ind.* 2023;18:100247. doi: 10.1016/j.indic.2023.100247

Tikhonova I. O., Guseva T. V., Shchelchikov K. A., Potapova E. N., Averochkin E. M. Best available techniques, general binding rules and decarbonisation of the construction materials industry. *Proc. 21st International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2021*. 2021;5.1:51–58. doi: 10.5593/sgem2021/5.1/s20.007

Vaiopoulou E., Aivasidis A. A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance. *Chemosphere*. 2008;72(7):1062–1068. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.04.044

Volkov S. N., Rublevskaya O. N., Tikhonova I. O., Guseva T. V., Ilikkanen M. Experience in the development of wastewater disposal facilities of SUE Vodokanal of St. Petersburg: stages of transition to best available techniques. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Management in Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020;6:104–120. (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2020-6-6

Поступила в редакцию / received: 07.08.2025; принята к публикации / accepted: 01.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Рублевская Ольга Николаевна

директор Департамента анализа и технологического развития систем водоснабжения и водоотведения

e-mail: Rublevskaya_ON@vodokanal.spb.ru

Бурвикова Юлиана Николаевна

канд. хим. наук, начальник отдела водных ресурсов

e-mail: jburvic1977@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Rublevskaya, Olga

Director of Department for Analysis and Technological Development of Water Supply and Sewerage Systems

Burvikova, Yuliana

Cand. Sci. (Chem.), Head of Water Resources Department

Гусева Татьяна Валериановна

д-р техн. наук, профессор, заместитель директора
по научной работе

e-mail: tatiana.v.guseva@gmail.com

Бегак Михаил Владимирович

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела
промышленной экологии

e-mail: mbegak@gmail.com

Guseva, Tatiana

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Director for Science

Begak, Mikhail

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher

УДК 581.1

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКТА *LAMINARIA DIGITATA* ИЗ БЕЛОГО МОРЯ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И ПИЩЕВУЮ ЦЕННОСТЬ МИКРОЗЕЛЕНИ РАПИНИ

Т. Г. Шibaева*, Е. Г. Шерудило, А. А. Рубаева, И. А. Лёвкин,
А. Ф. Титов

Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11,
Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *shibaeva@krc.karelia.ru

В условиях контролируемой внешней среды исследовали влияние экстракта ламинарии пальчаторассеченной *Laminaria digitata* (Huds.) Lamouroux (отход производства, ТУ 10.39.30-025-41669896-2019), сбор которой проводился в Белом море в акватории Соловецкого архипелага, на продуктивность и пищевую ценность микровзелени рапины *Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort. Результаты экспериментов позволили выявить оптимальную концентрацию раствора экстракта (10 мл/л) для использования при выращивании микровзелени рапины в качестве питательного раствора для полива с целью увеличения продуктивности (обеспечивая растения необходимым комплексом макро- и микроэлементов) и пищевой ценности микровзелени, которая рекомендуется в качестве функционального продукта для здорового питания. Применение более высоких концентраций раствора экстракта (50 мл/л) приводило к снижению продуктивности растений. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что изученный экстракт ламинарии может повышать устойчивость растений к абиотическим факторам среды, в частности к пониженной температуре. Совокупность полученных данных позволяет заключить, что экстракт ламинарии ТУ 10.39.30-025-41669896-2019 в соответствии с регламентом ЕС (2019/1009) можно считать немикробным биостимулятором растений.

Ключевые слова: экстракты водорослей; отходы производства; *Laminaria digitata*; биостимуляторы; микровзелень; продуктивность; пищевая ценность

Для цитирования: Шibaева Т. Г., Шерудило Е. Г., Рубаева А. А., Лёвкин И. А., Титов А. Ф. Влияние экстракта *Laminaria digitata* из Белого моря на продуктивность и пищевую ценность микровзелени рапины // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 119–128. doi: 10.17076/eco2283

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0004) и научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

T. G. Shibaeva*, E. G. Sherudilo, A. A. Rubaeva, I. A. Levkin, A. F. Titov.
**EFFECT OF THE WHITE SEA *LAMINARIA DIGITATA* EXTRACT ON THE YIELD
AND NUTRITIONAL VALUE OF RAPINI MICROGREENS**

*Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *shibaeva@krc.karelia.ru*

The effect of the extract of *Laminaria digitata* (Huds.) Lamouroux (industrial waste, TU 10.39.30-025-41669896-2019) collected in the White Sea near the Solovetsky Archipelago on the productivity and nutritional value of rapini *Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort. microgreens was studied under controlled environmental conditions. The experiment allowed us to identify the optimal concentration of the extract (10 ml/l) to be used as a nutrient solution for irrigation in order to augment the yield (providing plants with the necessary macro- and micronutrients) and the nutritional value of rapini microgreens, which are recommended as a functional health food. The use of higher concentrations of the extract solution (50 ml/l) resulted in a decreased yield. The results also indicate that the studied kelp extract can improve plant resistance to abiotic environmental factors, particularly low temperatures. Taken together, these findings suggest that according to the EU 2019/1009 regulation the *Laminaria* extract TU 10.39.30-025-41669896-2019 can be classified as a non-microbial plant biostimulant.

Keywords: seaweed extract; industrial waste; *Laminaria digitata*; biostimulant; microgreens; yield; nutritional value

For citation: Shibaeva T. G., Sherudilo E. G., Rubaeva A. A., Levkin I. A., Titov A. F. Effect of the White Sea *Laminaria digitata* extract on the yield and nutritional value of rapini microgreens. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 119–128. doi: 10.17076/eco2283

Funding. This study was supported by the federal budget (Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, FMEN-2022-0004) and the Center of Excellence in Research and Education “Russian Arctic: New Materials, Technologies and Research Methods”.

Введение

Безотходная переработка бурых водорослей позволяет рационально использовать их запасы и расширять ассортимент продукции на рынке. Особые перспективы в этом плане связаны с освоением водорослевых ресурсов Белого моря. В частности, промышленные запасы бурых водорослей в нем исчисляются десятками тысяч тонн, однако этот потенциал в значительной степени пока не осваивается, что создает возможность развивать новые инвестпроекты. В 2025 г. карельские компании добыли 1,6 тыс. т водорослей, на 43 % больше, чем в 2024 г. Но перед производителями стоит задача не только наращивать объемы, но и уйти от простой добычи водорослей к созданию продукции с высокой добавленной стоимостью. Поэтому уже ведется планомерная работа по созданию инфраструктуры для глубокой переработки водорослей, прорабатывается вопрос создания промышленных технопарков и научно-производственного центра по переработке морских биоресурсов в Республике Карелия на территории

Кемско-Беломорской агломерации (по информации Министерства сельского и рыбного хозяйства Республики Карелия в СМИ).

В процессе безотходной переработки бурых водорослей из сырья получают несколько продуктов, при этом отходы переработки утилизируются. Традиционными продуктами переработки бурых водорослей являются маннит и альгинат натрия. Остальные компоненты водорослей в настоящее время классифицируют как отходы. Однако вторичные продукты переработки бурых водорослей, как показывает мировая практика, вполне пригодны для дальнейшего использования. Учитывая это, нами в условиях контролируемой внешней среды исследовано влияние экстракта ламинарии (отход производства, ТУ 10.39.30-025-41669896-2019) на продуктивность и пищевую ценность микрозелени рапини при применении раствора экстракта в качестве питательного раствора для полива в условиях оптимальной и пониженной температуры. Рапини (*Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort.), известная также как спаржевая брокколи,

брокколи рабе, брокколи рааб, весенний рааб и руво кале, представляет собой богатый питательными веществами овощ семейства Brassicaceae. Она богата не только витаминами (А, С, К, Е и др.) и минеральными веществами (Са, Mg, P, K, Na, Fe, Zn, Cu и Mn), но и является хорошим источником пищевых волокон, фолиевой кислоты и различных антиоксидантов (аскорбиновая кислота, токоферолы, каротиноиды и глюкозинолаты) [Xiao et al., 2019; Zhang et al., 2021]. По своим полезным характеристикам рапини сходна с брокколи, обладая, к примеру, противораковым и противовоспалительным действием, способностью улучшать состояние сердечно-сосудистой системы и др.

Материалы и методы

Экстракт ламинарии (ТУ 10.39.30-025-41669896-2019, ООО «Архангельский водорослевый комбинат») является отходом производства и представляет собой темно-коричневую жидкость плотностью 1,3–1,4 г/см³ с рН 4 и массовой долей золы к сухому веществу 34 %. Сбор ламинарии пальчаторассеченной *Laminaria digitata* (Huds.) Lamouroux производился в акватории Соловецкого архипелага в Белом море.

Объектом исследования служила микрозелень рапини (*Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort.). Эксперименты проводили в климатических камерах Vötsch (Германия) при температуре 23 °С, влажности воздуха 70 %; интенсивность света составляла 150 мкмоль/(м² с) ФАР. Микрозелень выращивали на специальных ковриках из агроваты. В первые трое суток после посева контейнеры с микрозеленью помещали для проращивания

в темноту и поливали водой. Начиная с 4-го дня после посева (фаза полностью раскрывшихся семядолей) растения освещали в режиме 16/8 ч (день/ночь).

В первой серии опытов растения поливали водой или растворами экстракта ламинарии в концентрации 0, 2,5, 5, 25 мл/л, затем 0, 10, 25, 50 мл/л. Во второй серии опытов растения поливали водой (вариант 1), раствором экстракта ламинарии в концентрации 10 мл/л (вариант 2) и 50% питательным раствором Хогланда – Арнона (вариант 3). Значения рН и электропроводности растворов представлены в табл. 1. Электропроводность растворов измеряли с помощью кондуктометра Эксперт-002 (Эконикс-Эксперт, Россия), а рН – с помощью рН-метра Hanna HI-98199 (Hanna Instruments Ltd., Великобритания).

Вторую серию опытов проводили параллельно в условиях температуры 23 и 15 °С.

Растения анализировали на 12-е сут (при 23 °С) или 16-е сут (при 15 °С) после посева при появлении первого настоящего листа. Биометрические измерения проводили на десяти растениях и включали определение длины гипокотыля, сырого и сухого веса побегов. Урожайность рассчитывали как сырой вес побегов, срезанных с площади 10 см². Индекс робастности RI (от англ. *robust* – крепкий) определяли как отношение произведения сухой массы побега и диаметра гипокотыля к длине гипокотыля [Treadwell et al., 2020]. Оводненность побегов определяли путем взвешивания растительных образцов до и после высушивания при 105 °С до постоянного веса. Площадь листьев определяли с помощью программы AreaS после сканирования.

Таблица 1. Значения рН и электропроводности растворов экстракта ламинарии и питательного раствора
Table 1. The values of pH and electrical conductivity of solutions of *Laminaria* extract and nutrient solution

Вариант опыта Treatment	рН	ЕС, мСм/см Electrical conductivity of the solution, mS/cm
Вода Water	6,3	0,07
Экстракт ламинарии 2,5 мл/л <i>Laminaria</i> extract 2.5 ml/l	6,0	1,08
Экстракт ламинарии 5 мл/л <i>Laminaria</i> extract 5 ml/l	5,9	2,13
Экстракт ламинарии 10 мл/л <i>Laminaria</i> extract 10 ml/l	5,8	4,10
Экстракт ламинарии 25 мл/л <i>Laminaria</i> extract 25 ml/l	5,5	9,48
Экстракт ламинарии 50 мл/л <i>Laminaria</i> extract 50 ml/l	5,4	14,9
Питательный раствор Хогланда – Арнона (50%) Hoagland-Arnon nutrient solution (50%)	6,9	0,85

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов) определяли с помощью спектрофотометра СФ-2000 («Спектр», Россия) в экстракте 96% этилового спирта и рассчитывали по известным формулам [Lichtenthaler, Wellburn, 1983].

Для определения содержания антоцианов и флавоноидов навеску растительного материала гомогенизировали в 4 мл холодной смеси этанола и 1,5 N соляной кислоты (85:15, об/об) с последующей экстракцией в течение 14 ч в холодильнике в темноте. После 5 мин центрифугирования экстракта при 10 000 г и температуре +4 °С для антоцианов определяли оптическую плотность супернатанта при 530 и 657 нм на спектрофотометре СФ 2000 («Спектр», Россия). Суммарное содержание флавоноидов определяли спектрофотометрически при 300 нм в супернатанте для антоцианов (предварительно разбавив его в 10 раз) и рассчитывали как отношение оптической плотности к сырой массе (A300/г сырой массы) [Kolupaev et al., 2019].

Содержание свободного пролина в тканях листа оценивали спектрофотометрическим методом с использованием нингидринового реактива [Bates et al., 1973].

Экстракцию растворимых углеводов (сахаров) проводили дистиллированной водой согласно [Samuoliene et al., 2019], определяли их содержание с использованием антронового реактива [Kolupaev et al., 2019].

Для определения содержания нитратов навеску сухого растительного материала (0,1 г) гомогенизировали в 10 мл дистиллированной воды, экспонировали при температуре +45 °С в течение 1 ч и затем 15 мин центрифугировали при 5000 г. К 0,1 мл супернатанта добавляли 0,4 мл смеси салициловой кислоты (5 г) и концентрированной серной кислоты (100 мл), хорошо перемешивали и выдерживали 20 мин при комнатной температуре. Затем медленно добавляли 9,5 мл 8% раствора NaOH, смесь охлаждали до комнатной температуры и измеряли оптическую плотность при 410 нм на спектрофотометре СФ 2000. Содержание нитратов рассчитывали по стандартной концентрационной кривой с KNO₃ [Cataldo et al., 1975].

Для анализа активности антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы (СОД, КФ 1.15.1.1), каталазы (КАТ, КФ 1.11.1.6), аскорбатпероксидазы (АПО, КФ 1.11.1.11) и гваякол-пероксидазы (ГвПО, КФ 1.11.1.7) листья растений гомогенизировали в 50 мМ фосфатном буфере (рН 7,8), гомогенат центрифугировали при 14 000 г в течение 20 мин при 4 °С

и в супернатанте определяли активность ферментов с использованием спектрофотометра СФ-2000 [Shibaeva et al., 2023]. Активность АПО определяли в присутствии 0,5 мМ аскорбиновой кислоты и 0,25 мМ H₂O₂ по снижению оптической плотности при 290 нм; активность КАТ – по ферментативному разложению H₂O₂ при 240 нм; активность СОД – по способности ингибировать фотохимическую реакцию тетразолия нитросинего; активность ГвПО – на основании окисления гваякола в присутствии H₂O₂ при 470 нм. Активность ферментов рассчитывали на 1 г сухой массы листьев, а удельную активность – на 1 мг белка. Общее содержание белка определяли по Бредфорду, используя в качестве стандарта бычий сывороточный альбумин.

В работе представлены средние значения и их стандартные ошибки. Достоверность различий между средними значениями определяли на основе дисперсионного анализа (LSD тест) при $p < 0,05$ с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Результаты влияния экстракта ламинарии (2,5–50 мл/л) на рост и продуктивность микрозелени рапини представлены на рис. 1 и в табл. 2. По совокупности биометрических показателей (длина гипокотили, сырой вес побегов, содержание сухого вещества, урожайность на единицу площади, индекс робастности), показателей пищевой ценности (содержание хлорофилла, флавоноидов, белка, растворимых углеводов), безопасности (содержание нитратов) (табл. 3) и визуальной оценки лучший результат показали растения, выращенные при поливе раствором в концентрации 10 мл/л. У растений, выращенных при поливе раствором в концентрации 50 мл/л, снижались биометрические показатели (длина гипокотили, масса побега, урожайность) и визуальная оценка качества (рис. 1, табл. 2). Наши предыдущие исследования влияния этого экстракта ламинарии на прорастание семян и рост проростков огурца и пшеницы (используемых в качестве тест-объектов) выявили биостимулирующий эффект экстракта, который проявлялся при малых концентрациях раствора экстракта (0,25–10 мл/л) и зависел от способа воздействия на растения (предпосевная обработка семян или внесение в среду при проращивании семян) [Шибеева и др., 2025]. При использовании более высоких концентраций раствора экстракта (50 мл/л и выше) у растений

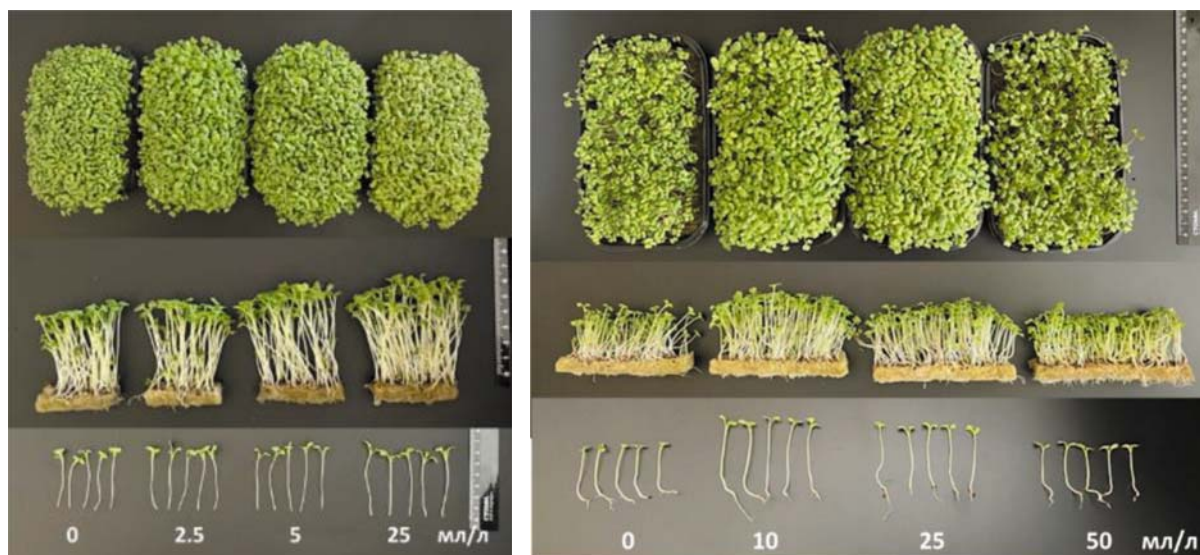


Рис. 1. Микрозелень рапини, выращенная при поливе растворами экстракта ламинарии в концентрации 0, 2,5, 5 и 25 мл/л (слева) и 0, 10, 25 и 50 мл/л (справа)

Fig. 1. Rapini microgreens grown under irrigation by *Laminaria* extract solutions of various concentrations – 0, 2.5, 5, 25 ml/l (left) and 0, 10, 25, 50 ml/l (right)

Таблица 2. Влияние растворов экстракта ламинарии на биометрические характеристики побегов микрозелени рапини

Table 2. Impact of *Laminaria* extract solutions on biometrical parameters of rapini microgreen shoots

Концентрация раствора, мл/л Concentration of extract solution, ml/l	Длина гипокотыля, мм Hypocotyl length, mm	Сырой вес побега, мг Shoot fresh weight, mg	Содержание сухого вещества, г/кг Dry matter content, g/kg	Урожайность, мг/см ² Yield, mg/cm ²	RI, мг/см RI, mg/cm
0	29,2 ± 0,7 ^b	24,9 ± 1,4 ^c	100,4 ± 8,0 ^b	141,1 ± 9,4 ^b	8,5 ± 0,4 ^b
2,5	29,8 ± 0,8 ^b	24,6 ± 1,7 ^c	101,3 ± 8,5 ^b	143,6 ± 15,9 ^b	8,3 ± 0,3 ^b
5	31,8 ± 0,8 ^b	28,4 ± 1,9 ^b	103,4 ± 7,5 ^b	150,7 ± 23,6 ^b	8,9 ± 0,5 ^b
10	36,5 ± 1,0 ^a	39,1 ± 2,0 ^a	102,3 ± 12,8 ^b	216,5 ± 27,6 ^a	10,7 ± 0,3 ^a
25	28,5 ± 1,3 ^b	29,7 ± 2,4 ^b	98,3 ± 7,3 ^b	165,3 ± 16,7 ^b	10,4 ± 0,6 ^a
50	17,8 ± 0,8 ^c	19,1 ± 1,1 ^d	120,4 ± 7,2 ^a	143,6 ± 28,9 ^b	10,7 ± 0,5 ^a

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4 разные буквы указывают на достоверность различий между средними значениями при $p < 0,05$.

Note. Here and in Tables 3, 4 different letters for each plant species indicate significant differences between the mean values at $p < 0.05$.

Таблица 3. Влияние растворов экстракта ламинарии на содержание хлорофилла, флавоноидов, белка, растворимых углеводов и нитратов в микрозелени рапини

Table 3. Impact of *Laminaria* extract solutions on chlorophyll, flavonoid, protein, soluble sugars, and nitrates content in rapini microgreens

Концентрация раствора, мл/л Concentration of extract solution, ml/l	Хлорофилл a+b, мг/г Chlorophyll, mg/g	Флавоноиды, A ₃₀₀ /г Flavonoids, A ₃₀₀ /g	Белок, мг/г Protein, mg/g	Растворимые углеводы, мкг/г Soluble carbohydrates, µg/g	Нитраты, мкг/г Nitrates, µg/g
0	5,3 ± 0,2 ^c	27,6 ± 1,6 ^a	52,9 ± 2,7 ^b	270 ± 32 ^{ab}	680 ± 38 ^c
2,5	5,4 ± 0,3 ^{bc}	26,4 ± 1,7 ^a	52,5 ± 3,1 ^b	262 ± 28 ^b	685 ± 29 ^c
5	6,0 ± 0,3 ^b	25,7 ± 2,0 ^a	55,8 ± 2,2 ^b	271 ± 24 ^b	782 ± 31 ^b
10	7,1 ± 0,4 ^a	26,8 ± 3,4 ^a	62,8 ± 4,4 ^a	319 ± 19 ^a	829 ± 75 ^b
25	7,0 ± 0,3 ^a	21,4 ± 1,6 ^b	67,0 ± 3,1 ^a	275 ± 36 ^{ab}	1080 ± 145 ^a
50	7,4 ± 0,5 ^a	20,0 ± 0,8 ^b	63,0 ± 3,4 ^a	268 ± 37 ^{ab}	1114 ± 17 ^a

также наблюдали выраженное торможение ростовых процессов. Отметим, что когда экстракт добавляли в раствор для гидропоники, небольшое ростостимулирующее действие наблюдалось при применении концентраций 0,25–0,5 мл/л, а растворы экстрактов в концентрации 0,75–5 мл/л оказывали ингибирующее действие на рост корней [Шибалева и др., 2025].

Изучаемый экстракт ламинарии содержит в своем составе набор минеральных веществ (K, Mg, Ca, Fe, Na, Mn, Cd) и 16 аминокислот. Следовательно, одной из причин положительного влияния данного экстракта на рост растений может быть обеспечение их необходимым комплексом макро- и микроэлементов, отсутствующим в воде (контроле). В то же время это не исключает влияния биологически активных веществ, содержащихся в экстракте. В литературе имеется большое количество описаний защитного эффекта применения экстрактов морских водорослей против стресса, вызванного дефицитом элементов минерального питания. Например, экстракты *Ascophyllum nodosum* вызывали увеличение биомассы растений салата [Chrysargyris et al., 2018], а также длины побегов, площади и длины листьев, степени ветвления у растений миндаля в условиях, когда они испытывали дефицит калия [Saa et al., 2015]. Применение четырех коммерческих экстрактов на основе *A. nodosum* и *Durvillaea potatorum* на растениях томата снижало уровень стресса, вызванного дефицитом железа [Carrasco-Gil et al., 2018].

Ингибирующее действие экстракта ламинарии более высоких концентраций может быть связано с чрезмерно высокой электропроводностью раствора, обусловленной высокой концентрацией веществ в экстракте. Так, растворы экстракта в концентрации выше 10 мл/л значительно выходят за пределы нормального диапазона электропроводности, подходящего для выращивания растений (0,5–2,5 мСм/см) (табл. 1). Еще одной возможной причиной негативного воздействия растворов экстракта в более высоких концентрациях может быть действие на растения полифенолов, содержащихся в экстракте. Известно, что их содержание в арктических водорослях может в десятки раз превышать таковое в водорослях тех же видов, произрастающих в более южных водах [Клиндух, Облучинская, 2013; Боголицын и др., 2018].

В дальнейшем с концентрацией раствора экстракта ламинарии 10 мл/л, выбранной нами в качестве рабочей, была проведена серия сравнительных опытов с выращиванием

микрозелени при поливе водой, раствором экстракта ламинарии и питательным раствором Хогланда – Арнона. Результаты показали, что в оптимальных условиях (23 °C) растения рапины, выращенные на растворе экстракта, значительно превосходили растения, выращенные на воде, по высоте, площади листьев, массе побега, урожайности на единицу площади, содержанию хлорофилла, каротиноидов, белка и пролина (рис. 2, табл. 4). При этом по ряду показателей (высота, площадь листьев, масса побега, урожайность, содержание фотосинтетических пигментов, белка) растения, выращенные на растворе экстракта, уступали растениям в варианте опыта с питательным раствором Хогланда – Арнона. Содержание нитратов было ниже у растений, выращенных на воде и растворе экстракта. По содержанию углеводов, антоцианов и флавоноидов растения в вариантах опыта не различались (данные не приводятся). Активность антиоксидантных ферментов была схожа, отмечено лишь увеличение активности ГПО в варианте с экстрактом и КАТ у растений, выращенных на воде.

Аналогичная серия опытов, проведенная в условиях пониженной температуры (15 °C), показала, что растения, выращенные на растворе экстракта, превосходят по тем же показателям растения, выращенные на воде, но не отличаются достоверно от растений, выращенных на питательном растворе, по площади листьев, массе побега, урожайности, оводненности, содержанию хлорофилла, антоцианов, флавоноидов, пролина и углеводов (табл. 4). Активность антиоксидантных ферментов (КАТ, СОД и АПО) была максимальной у растений, выращенных на растворе экстракта, что, вероятно, позволило им лучше переносить действие пониженной температуры. В литературе также имеются данные, свидетельствующие о том, что экстракты морских водорослей могут повышать устойчивость растений к низким температурам, лимитирующим рост и развитие растений. Например, препарат Algafert на основе экстрактов из *A. nodosum*, *Fucus* spp. и *Laminaria* spp. снижал степень некроза листьев и увеличивал плотность корней у растений кукурузы, подвергавшихся действию пониженных температур (12–14 °C) в зоне корней в течение двух недель [Bradacova et al., 2016]. Коммерческий экстракт из *A. nodosum* Seasol повышал морозостойкость винограда [Wilson, 2001], а обработка препаратом Maxicrop озимого ячменя способствовала повышению зимо- и морозостойкости растений в полевых условиях [Burchett et al., 1998].

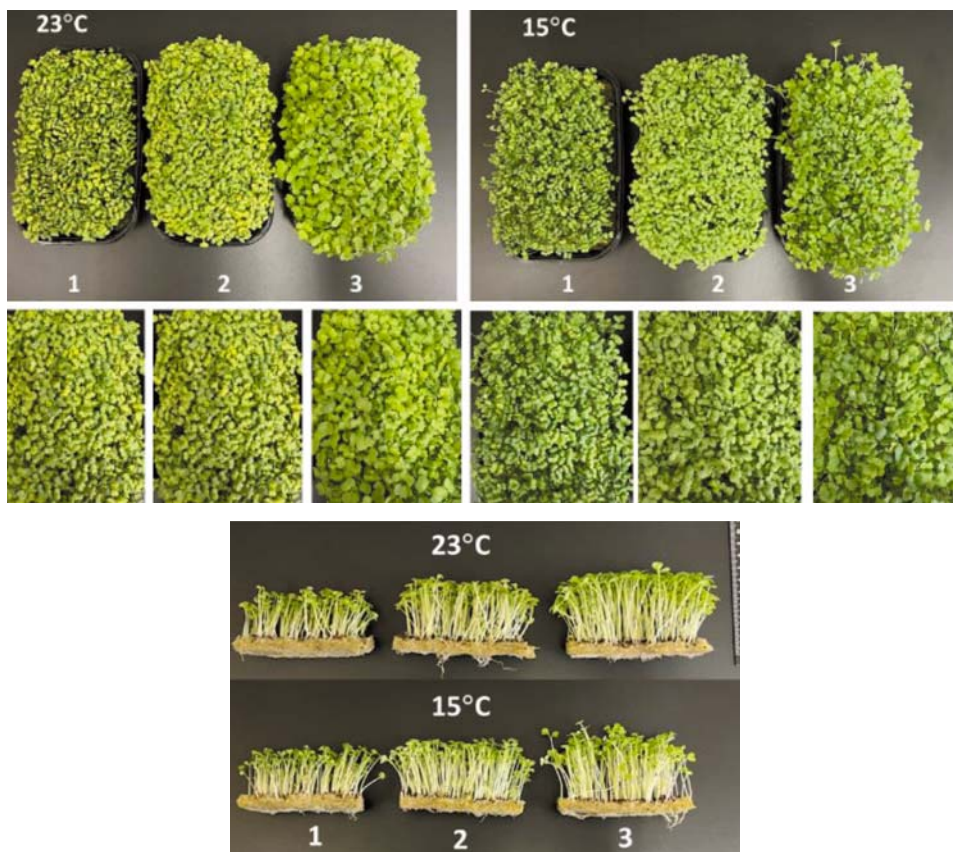


Рис. 2. Микрозелень рапини, выращенная при температуре 23 и 15 °С при поливе водой (1), экстрактом ламинарии 10 мл/л (2) и 50% питательным раствором Хогланда – Арнона (3)

Fig. 2. Rapini microgreens grown at 23 °C and 15 °C irrigated by water (1), *Laminaria* extract 10 ml/l (2) and 50% Hoagland-Arnon nutrient solution (3)

Таблица 4. Биометрические и биохимические показатели растений рапини, выращенных в условиях оптимальной (23 °С) и пониженной (15 °С) температуры

Table 4. Biometric and biochemical parameters of rapini microgreens grown at optimal (23 °C) and low (15 °C) temperature

Показатель Variable	Вариант опыта Treatments					
	23 °			15 °		
	1	2	3	1	2	3
Длина hypocotyla, мм Hypocotyl length, mm	28,7 ± 1,1 ^c	38,1 ± 1,5 ^b	48,0 ± 1,3 ^a	37,5 ± 1,4 ^c	40,2 ± 1,3 ^b	50,1 ± 1,6 ^a
Площадь листьев, мм ² Leaf area, mm ²	92 ± 3 ^c	101 ± 5 ^b	174 ± 8 ^a	72 ± 3 ^b	109 ± 5 ^a	106 ± 5 ^a
Сырой вес побега, мг Shoot fresh weight, mg	20,2 ± 0,7 ^c	32,5 ± 1,9 ^b	48,4 ± 3,1 ^a	23,2 ± 1,6 ^b	36,8 ± 2,6 ^a	33,3 ± 2,2 ^a
Содержание сухого вещества, г/кг Dry matter content, g/kg	109 ± 6 ^a	101 ± 7 ^a	74 ± 8 ^b	87 ± 6 ^a	62 ± 5 ^b	61 ± 7 ^b
Урожайность, мг/см ² Yield, mg/cm ²	97,1 ± 6,4 ^c	156,8 ± 16,4 ^b	210,9 ± 8,7 ^a	98,8 ± 6,7 ^b	175,9 ± 7,0 ^a	183,0 ± 8,0 ^a
Хлорофилл a+b, мг/г Chlorophyll, mg/g	5,8 ± 0,4 ^b	7,1 ± 0,4 ^{ab}	9,9 ± 0,7 ^a	8,2 ± 0,6 ^b	9,4 ± 1,1 ^{AB}	10,8 ± 0,6 ^a
Каротиноиды, мг/г Carotenoids, mg/g	1,06 ± 0,03 ^c	1,19 ± 0,05 ^b	1,53 ± 0,02 ^a	1,3 ± 0,1 ^b	1,4 ± 0,1 ^b	1,7 ± 0,1 ^a

Окончание табл. 4
Table 4 (continued)

Показатель Variable	Вариант опыта Treatments					
	23 °			15 °		
	1	2	3	1	2	3
Белок, мг/г Protein, mg/g	98,5 ± 4,0 ^c	125,8 ± 0,6 ^b	156,3 ± 0,1 ^a	114,2 ± 3,0 ^b	148,1 ± 5,5 ^A	147,8 ± 2,3 ^A
Пролин, мкмоль/г Proline, μmol/g	486 ± 41 ^b	946 ± 89 ^a	449 ± 36 ^b	567 ± 24 ^A	560 ± 40 ^A	670 ± 92 ^A
КАТ, мкмоль/мг мин CAT, μmol/mg min	27,5 ± 2,1 ^a	22,6 ± 1,8 ^b	24,3 ± 2,1 ^{ab}	24,8 ± 3,7 ^B	32,2 ± 2,3 ^A	27,9 ± 2,9 ^{AB}
СОД, у.е./мг белка SOD, unit/mg protein	13,5 ± 1,2 ^a	14,2 ± 1,6 ^a	12,2 ± 0,8 ^a	9,6 ± 1,2 ^B	13,0 ± 1,3 ^A	9,9 ± 1,0 ^B
АПО, мкмоль/мг мин APX, μmol/mg min	100 ± 3 ^a	112 ± 2 ^a	121 ± 20 ^a	114 ± 16 ^B	189 ± 22 ^A	138 ± 14 ^B
ГПО, мкмоль/мг мин GPX, μmol/mg min	302 ± 28 ^b	450 ± 100 ^a	319 ± 51 ^b	395 ± 35 ^A	326 ± 16 ^B	284 ± 12 ^C
Нитраты, мкг/г Nitrates, μg/g	654 ± 39 ^b	573 ± 24 ^b	2506 ± 133 ^a	719 ± 59 ^B	612 ± 22 ^{AB}	2527 ± 110 ^A

Примечание. Варианты опыта: 1 – вода, 2 – экстракт ламинарии 10 мл/л, 3 – 50% питательный раствор Хогланда – Арнона.
Note. Treatments: 1 – water, 2 – *Laminaria* extract 10 ml/l, 3 – 50% Hoagland-Arnon nutrient solution.

Заключение

Понятие «биостимулятор растений» определяется как «продукт, назначение которого заключается в стимулировании процессов питания растений независимо от содержания питательных веществ в продукте с целью улучшения одной или более из следующих характеристик растения (или ризосферы растения): а) эффективность поглощения и использования питательных веществ растениями, б) устойчивость растений к абиотическому стрессу, в) качественные признаки культур и г) доступность ограниченных питательных веществ в почве или ризосфере» [European..., 2019].

Проведенная нами работа по изучению влияния экстракта ламинарии на рост, продуктивность и пищевую ценность (содержание белков, углеводов и веществ с антиоксидантными свойствами) микрозелени рапини показала, что данный экстракт в концентрации 10 мл/л может применяться в качестве питательного раствора для полива при выращивании микрозелени, обеспечивая растения необходимым комплексом макро- и микроэлементов и увеличивая пищевую ценность микрозелени, которая рекомендуется в качестве функционального продукта (functional food) для здорового питания. Более высокие концентрации (50 мл/л и выше) могут вызывать торможение роста растений.

Полученные результаты также свидетельствуют о том, что изученный экстракт ламинарии может повышать устойчивость растений к абиотическим факторам среды, в частности к пониженной температуре.

Проведенные исследования подтверждают, что использование экстрактов, являющихся отходами переработки водорослей, требует специальной методической проработки, а именно выявления эффективных концентраций растворов экстрактов, способа обработки ими растений и установления видовых (сортовых) особенностей в реакции разных культур на обработку.

В целом из совокупности полученных данных можно заключить, что изученный нами экстракт ламинарии (ТУ 10.39.30-025-41669896-2019) может быть отнесен к группе немикробных биостимуляторов растений (в соответствии с регламентом ЕС (2019/1009) «Об установлении правил размещения удобрений на рынке ЕС»). Очевидно, что более полно преимущества экстрактов морских водорослей могут быть реализованы в растениеводстве прежде всего в результате дальнейших исследований их химической (биохимической) природы и механизмов действия на продуктивность растений, а также на те или иные их характеристики как пищевого продукта.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Литература

Боголицын К. Г., Дружинина А. С., Овчинников Д. В., Каплицин П. А., Шульгина Е. В., Паршина А. В. Полифенолы бурых водорослей // Химия

растительного сырья. 2018. № 3. С. 5–21. doi: 10.14258/jcprm.2018031898

Клиндух М. П., Облучинская Е. Д. Сравнительное исследование химического состава бурых водорослей *Fucus vesiculosus* и *Ascophyllum nodosum* // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 466–471.

Шibaева Т. Г., Шерудило Е. Г., Рубаева А. А., Левкин И. А., Титов А. Ф. О возможном применении отходов переработки *Laminaria digitata* из Белого моря в качестве биостимуляторов растений // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 8. С. 196–204. doi: 10.17076/eco2253

Bates L. S., Waldren R. P., Teare I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies // Plant Soil. 1973. Vol. 39. P. 205–207. doi: 10.1007/BF00018060

Bradacova K., Weber N. F., Morad-Talab N., Asim M., Imran M., Weinmann M., Neumann G. Micro-nutrients (Zn/Mn), seaweed extracts, and plant growth-promoting bacteria as cold-stress protectants in maize // Chem. Biol. Technol. Agric. 2016. Vol. 3. Art. 9. doi: 10.1186/s40538-016-0069-1

Burchett S., Fuller M. P., Jellings A. J. Application of seaweed extract improves winter hardiness of winter barley cv. Igri // Proceedings of the Society for Experimental Biology, Annual Meeting, The York University, March 22–27, 1998. Springer, 1998.

Carrasco-Gil S., Hernandez-Apaolaza L., Lucena J. J. Effect of several commercial seaweed extracts in the mitigation of iron chlorosis of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) // Plant Growth Regul. 2018. Vol. 86. P. 401–411. doi: 10.1007/s10725-018-0438-9

Cataldo D. A., Haroon M., Schrader L. E., Youngs V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1975. Vol. 6. P. 71–80. doi: 10.1080/00103627509366547

Chrysargyris A., Xylia P., Anastasiou M., Pantelides I., Tzortzakis N. Effects of *Ascophyllum nodosum* seaweed extracts on lettuce growth, physiology and fresh-cut salad storage under potassium deficiency // J. Sci. Food Agric. 2018. Vol. 98. P. 5861–5872. doi: 10.1002/jsfa.9139

European Union. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003. 2019. P. 114. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj> (дата обращения: 12.01.2026).

Kolupaev Y. E., Fisoва E. N., Yastreb T. O., Ryabchun N. I., Kirichenko V. V. Effect of hydrogen sulfide donor on antioxidant state of wheat plants and their resistance to soil drought // Russ. J. Plant Physiol. 2019. Vol. 66. P. 59–66. doi: 10.1134/S1021443719010084

Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // Biochem. Soc. Trans. 1983. Vol. 11. P. 591–592.

Saa S., Olivos-Del Rio A., Castro S., Brown P. H. Foliar application of microbial and plant based biostimulants increases growth and potassium uptake in almond

(*Prunus dulcis* [Mill.] D. A. Webb) // Front. Plant Sci. 2015. Vol. 6. Art. 87. doi: 10.3389/fpls.2015.00087

Samuoliene G., Brazaityte A., Virsile A., Miliauskienė J., Vastakaitė-Kairienė V., Duchovskis P. Nutrient levels in Brassicaceae microgreens increase under tailored light-emitting diode spectra // Front. Plant Sci. 2019. Vol. 10. Art. 1475. doi: 10.3389/fpls.2019.01475

Shibaeva T. G., Rubaeva A. A., Sherudilo E. G., Titov A. F. Continuous lighting increases yield and nutritional value and decreases nitrate content in Brassicaceae microgreens // Russ. J. Plant Physiol. 2023. Vol. 70, no. 6. P. 623–634. doi: 10.31857/S0015330323600262

Treadwell D. D., Hochmuth R., Landrum L., Laughlin W. Microgreens: A new specialty crop // EDIS. 2020. Ed. 5. HS1164. doi: 10.32473/edis-hs1164-2020

Wilson S. Frost management in cool climate vineyards // University of Tasmania Research Report UT 99/1, Grape and Wine Research & Development Corporation. 2001.

Xiao Z., Rausch S. R., Luo Y., Sun J., Yu L., Wang Q., Chen P., Yu L., Stommel J. R. Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity // LWT – Food Science and Technology. 2019. Vol. 101. P. 731–737. doi: 10.1016/j.lwt.2018.10.076

Zhang Y., Zha L., Liu W., Zhou C., Shao M., Yang Q. LED light quality of continuous light before harvest affects growth and AsA metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen // Plants. 2021. Vol. 10. Art. 176. doi: 10.3390/plants10010176

References

Bates L. S., Waldren R. P., Teare I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*. 1973;39:205–207. doi: 10.1007/BF00018060

Bogolitsyn K. G., Druzhinina A. S., Ovchinnikov D. V., Kaplitsin P. A., Shul'gina E. V., Parshina A. V. Polyphenols of brown seaweeds. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chem. Plant Raw Materials*. 2018;3:5–21. (In Russ.). doi: 10.14258/jcprm.2018031898

Bradacova K., Weber N. F., Morad-Talab N., Asim M., Imran M., Weinmann M., Neumann G. Micro-nutrients (Zn/Mn), seaweed extracts, and plant growth-promoting bacteria as cold-stress protectants in maize. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 2016;3:9. doi: 10.1186/s40538-016-0069-1

Burchett S., Fuller M. P., Jellings A. J. Application of seaweed extract improves winter hardiness of winter barley cv. Igri. *Proceedings of the Society for Experimental Biology, Annual Meeting, The York University, March 22–27, 1998*. Springer; 1998.

Carrasco-Gil S., Hernandez-Apaolaza L., Lucena J. J. Effect of several commercial seaweed extracts in the mitigation of iron chlorosis of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant Growth Regul.* 2018;86:401–411. doi: 10.1007/s10725-018-0438-9

Cataldo D. A., Haroon M., Schrader L. E., Youngs V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1975;6:71–80. doi: 10.1080/00103627509366547

Chrysargyris A., Xylia P., Anastasiou M., Pantelides I., Tzortzakis N. Effects of *Ascophyllum nodosum* seaweed extracts on lettuce growth, physiology and fresh-cut salad storage under potassium deficiency. *J. Sci. Food Agric.* 2018;98:5861–5872. doi: 10.1002/jsfa.9139

European Union. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003. 2019:114. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj> (accessed: 12.01.2026).

Klindukh M. P., Obluchinskaya E. D. Comparative study of the chemical composition of brown seaweeds *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum*. *Vestnik MGTU = Herald of MSTU.* 2013;16(3):466–471. (In Russ.)

Kolupaev Y. E., Fisova E. N., Yastreba T. O., Ryabchun N. I., Kirichenko V. V. Effect of hydrogen sulfide donor on antioxidant state of wheat plants and their resistance to soil drought. *Russ. J. Plant Physiol.* 2019;66:59–66. doi: 10.1134/S1021443719010084

Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 1983;11:591–592.

Saa S., Olivos-Del Rio A., Castro S., Brown P. H. Foliar application of microbial and plant based biostimulants increases growth and potassium uptake in almond (*Prunus dulcis* [Mill.] D. A. Webb). *Front. Plant Sci.* 2015;6:87. doi: 10.3389/fpls.2015.00087

Samuoliene G., Brazaityte A., Virsile A., Miliauskiene J., Vastakaite-Kairiene V., Duchovskis P. Nutri-

ent levels in Brassicaceae microgreens increase under tailored light-emitting diode spectra. *Front. Plant Sci.* 2019;10:1475. doi: 10.3389/fpls.2019.01475

Shibaeva T. G., Rubaeva A. A., Sherudilo E. G., Titov A. F. Continuous lighting increases yield and nutritional value and decreases nitrate content in Brassicaceae microgreens. *Russ. J. Plant Physiol.* 2023;70(6):623–634. doi: 10.31857/S0015330323600262

Shibaeva T. G., Sherudilo E. G., Rubaeva A. A., Levkin I. A., Titov A. F. On the possible use of White Sea *Laminaria digitata* processing wastes as plant biostimulants. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2025;8:196–204. (In Russ.). doi: 10.17076/eco2253

Treadwell D. D., Hochmuth R., Landrum L., Laughlin W. Microgreens: A new specialty crop. *EDIS.* 2020;5:HS1164. doi: 10.32473/edis-hs1164-2020

Wilson S. Frost management in cool climate vineyards. *University of Tasmania Research Report UT 99/1, Grape and Wine Research & Development Corporation.* 2001.

Xiao Z., Rausch S. R., Luo Y., Sun J., Yu L., Wang Q., Chen P., Yu L., Stommel J. R. Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity. *LWT – Food Science and Technology.* 2019;101:731–737. doi: 10.1016/j.lwt.2018.10.076

Zhang Y., Zha L., Liu W., Zhou C., Shao M., Yang Q. LED light quality of continuous light before harvest affects growth and AsA metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen. *Plants.* 2021;10:176. doi: 10.3390/plants10010176

Поступила в редакцию / received: 14.01.2026; принята к публикации / accepted: 16.01.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шибяева Татьяна Геннадиевна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: shibaeva@krc.karelia.ru

Шеруди́ло Елена Георгиевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник
e-mail: sherudil@krc.karelia.ru

Рубаева Александра Александровна

аспирант
e-mail: arubaeva@krc.karelia.ru

Лёвкин Илья Александрович

аспирант
e-mail: levkin-556@mail.ru

Титов Александр Федорович

чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, профессор,
руководитель лаборатории экологической
физиологии растений
e-mail: titov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Shibaeva, Tatyana

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Sherudilo, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Rubaeva, Alexandra

Doctoral Student

Levkin, Ilya

Doctoral Student

Titov, Alexander

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Biol.), Professor,
Head of Laboratory

НИКОЛАЙ ВИКТОРОВИЧ ИЛЬМАСТ (к 60-летию со дня рождения)



19 апреля 2025 г. исполнилось 60 лет Николаю Викторовичу Ильмасту, доктору биологических наук, доценту, заместителю генерального директора по научно-организационной работе КарНЦ РАН, директору Института биологии КарНЦ РАН, главному научному сотруднику и руководителю лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных ИБ КарНЦ РАН.

Николай Викторович родился в 1965 году в г. Кондопоге. Закончив учебу в школе в 1982 году, он поступил на биологический факультет Петрозаводского государственного университета, где выбрал специализацию «ихтиология».

После окончания университета началось его профессиональное становление в Институте биологии КарНЦ РАН, где за многолетний период работы он прошел путь от лаборантской должности до директора института. В 1999 г. Н. В. Ильмастом была успешно защищена кандидатская диссертация на тему «Сиговые рыбы некоторых водоемов Карелии и Финляндии», а в 2012 г. – докторская диссертация на тему «Рыбное население пресноводных экосистем Карелии в условиях их хозяйственного освоения», защита которой прошла в ИПЭЭ РАН (г. Москва).

Н. В. Ильмаст – высококвалифицированный специалист в области ихтиологии и экологии, знающий современные научные проблемы, умеющий ставить четкие научные цели и задачи и успешно решать их. Под руководством Николая Викторовича и при непосредственном его участии выполнен большой объем научных исследований лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных. В частности, проведен сравнительный анализ оригинальных материалов по вселению различных видов рыб в водоемы Карелии. Дана оценка результативности работ по акклиматизации новых видов рыб, выявлены факторы, способствующие их выживанию в озерных экосистемах. В последние годы Николай Викторович активно занимается изучением влияния техногенного загрязнения и товарного форелеводства на состояние водных экосистем Республики Карелия. Проведенный сотрудниками лаборатории анализ полученных данных позволил выявить, что в водоемах с высоким уровнем антропогенной нагрузки происходит упрощение структуры водных сообществ, изменение популяционных параметров рыб и выпадение отдельных их видов. Н. В. Ильмастом совместно с коллегами предложена оригинальная методика оценки степени воздействия форелевых хозяйств

на водные экосистемы Карелии, которая применяется для экспертной оценки в других подобных хозяйствах Северо-Запада России.

Ихтиологические исследования предполагают многочисленные полевые выезды и командировки. На протяжении ряда лет Николай Викторович является организатором и участником многочисленных экспедиционных ихтиологических исследований на территории Республики Карелия (РК), Мурманской области, а ранее и за рубежом.

Исследования, проводимые Н. В. Ильмастом, поддерживались российскими научными фондами (РФФИ, РГНФ, РНФ), федеральными программами ФЦНТП и ФЦП, программами фундаментальных исследований Президиума РАН и Отделения биологических наук РАН, региональными программами Министерства сельского, рыбного и охотничьего хозяйства РК, Министерства экономического развития РК и др. Результаты выполненных работ широко используются рыбохозяйственными учреждениями и организациями Карелии при прогнозировании возможных изменений в составе рыбного населения водоемов с различными антропогенными воздействиями, при составлении региональных программ по рациональному использованию рыбных запасов внутренних водоемов, для оценки рыбопродуктивности озер и оптимизации режимов промысла, для расчета объемов выращивания форели в садках. Материалы исследований учитываются при подготовке предложений по организации особо охраняемых природных территорий РК.

Николай Викторович – автор более 350 научных работ, в том числе семи коллективных монографий, а также четырех учебных пособий. Его работы опубликованы в таких отечественных журналах, как «Вопросы ихтиологии», «Экология», «Паразитология», «Известия РАН», «Биология внутренних вод», «Рыбоводство и рыбное хозяйство», «Вопросы рыболовства», а также в высокорейтинговых зарубежных изданиях. Совместно с коллегами им получены восемь свидетельств на регистрацию баз данных. Результаты своих исследований Н. В. Ильмаст регулярно представляет на многочисленных зарубежных, международных и всероссийских научных конференциях, симпозиумах, съездах, активно сотрудничает со многими отечественными и зарубежными специалистами.

Научно-исследовательскую работу Н. В. Ильмаст успешно совмещает с преподавательской деятельностью, подготовкой научных кадров. Он читает курсы лекций «Ихтиология», «Физиология рыб», «Гидрология» для студентов

II–IV курсов ПетрГУ. Большое внимание в этой работе Николай Викторович уделяет обучению студентов новым современным методам исследований, обработке и обобщению полученной информации. Осуществляет руководство практикой, подготовкой курсовых и дипломных работ, оказывает консультативную помощь при проведении исследований, всегда стремится увлечь молодых исследователей актуальными научными проблемами.

Н. В. Ильмаст является экспертом по лососевым рыбам Межведомственной ихтиологической комиссии при Росрыболовстве, Председателем Карельского отделения Гидробиологического общества при РАН, заместителем ответственного редактора серии «Экологические исследования» «Трудов Карельского научного центра РАН», был председателем ГЭК агротехнического факультета ПетрГУ. Он регулярно выступает в качестве официального оппонента при защите кандидатских и докторских диссертаций. За последние 5 лет Н. В. Ильмаст являлся руководителем и ответственным исполнителем 15 хозяйственных договоров с предприятиями рыбохозяйственной отрасли, а также участвовал в проведении более 200 ихтиологических судебных экспертиз для сотрудников правоохранительных ведомств. Эта работа активно продолжается и в настоящее время.

Помимо большой научной деятельности Николай Викторович ведет активную научно-организационную работу, с 2023 года занимая пост директора института. Необходимо отметить, что во всех видах деятельности Н. В. Ильмаст заявил о себе как умелый организатор и руководитель науки, обладающий такими ценными качествами, как высокая работоспособность, организованность, глубокая заинтересованность в работе.

Многолетняя научная и организационная деятельность Николая Викторовича отмечена Почетными грамотами Российской академии наук и Профсоюза работников РАН, Президиума Карельского научного центра РАН. В 2016 г. ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки Республики Карелия», в 2021 г. он награжден медалью «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития», а в 2025 г. – медалью «За заслуги перед Республикой Карелия».

Сотрудники института поздравляют Николая Викторовича с юбилеем! Желаем неиссякаемой энергии, успехов во всех начинаниях, удачи в достижении поставленных целей и крепкого здоровья!

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ ТРУДОВ Н. В. ИЛЬМАСТА

1992. Особенности биологии сига Сямозера в связи с эвтрофированием водоема // Биологические исследования растительных и животных систем. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 79–87. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

1995. The structure and biodiversity of water ecosystems in Lake Tolvojarvi // Karelian Biosphere Reserve. Studies. North Karelian Biosphere Reserve. Joensuu. P. 235–242. (Совместно с А. В. Ryabinkin, А. В. Freindling, Р. А. Lozovik, О. Р. Sterligova, V. Ya. Pervozvansky, А. J. Kalugin, А. L. Chupukov.)

1997. Биомониторинг озерно-речной системы р. Лижма (южная Карелия) // Мониторинг биоразнообразия. М.: ВТИИ. С. 307–313. (Совместно с О. П. Стерлиговой, С. Ф. Комулайне-ном, Я. А. Кучко, С. А. Павловским, А. К. Морозовым.)

1999. Сиги озера Мантоярви // Вопросы ихтиологии. Т. 39, № 1. С. 120–124. (Совместно с О. П. Стерлиговой, В. В. Хренниковым, Э. Ние-меля, М. Каукоранта.)

Сиговые рыбы некоторых водоемов Карелии и Финляндии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск. 25 с.

2001. The effect of a trout farm on the lake-river system of the river Lishma // Ecogidrology and Hydrobiology. Vol. 1, no. 1–2. P. 219–228. (Совместно с О. Р. Sterligova, S. F. Komulainen, S. A. Pavlovsky, Ya. A. Kuchko.)

2002. Сиговые рыбы озера Пюхьярви и изменения рыбного населения под воздействием интродукции новых видов // Вопросы ихтиологии. Т. 42, № 6. С. 763–767. (Совместно с В. В. Хренниковым.)

Coregonid fishes of Lake Tulos // Advances in Limnology. Vol. 57. P. 479–485. (Совместно с О. Р. Sterligova, V. Yu. Pervozvansky, S. P. Kitaev.)

2003. Изменение структуры рыбного населения малых и средних водоемов Финно-скандии // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 213–220. (Совместно с О. П. Стерлиговой, В. Я. Первозванским, С. П. Китаевым.)

Питание малотычинкового сига *Coregonus lavaretus* (L.) малых водоемов национального парка «Паанаярви» // Труды Карельского научного центра РАН. Природа национального парка «Паанаярви». Вып. 3. С. 139–144. (Совместно с В. В. Хренниковым, Ю. А. Шустовым.)

Сиги *Coregonus lavaretus* (L.) малых водоемов Северной Лапландии (Финляндия) //

Вопросы ихтиологии. Т. 43, № 3. С. 338–344. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

2004. Многолетняя динамика структурных и системных характеристик рыбного населения эвтрофируемого Сямозера // Биология внутренних вод. № 3. С. 93–102. (Совместно с В. Г. Терещенко, О. П. Стерлиговой, В. Т. Павловым.)

An analysis of work on artificial reproduction of the Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.), of Lake Ladoga // Sustainable Use, Management and Monitoring of Fish Resources in Lake Ladoga (ed. M. Viljanen). University of Joensuu, Report of Karelian Institute. No. 4. P. 87–94.

The results of the introduction of coregonid fishes into Vashozero a lake in southern // Biology and Management of Coregonid Fishes. Finnish Zoological and Botanical Publishing. Vol. 41, no. 1. P. 191–194. (Совместно с О. Р. Sterligova.)

2005. Балансовая модель биотического сообщества Сямозера: Опер.-информ. мат-лы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 55 с. (Совместно с Е. А. Криксуновым, А. Е. Бобыревым, В. А. Бурменским, В. Н. Павловым, О. П. Стерлиговой.)

Введение в ихтиологию: учебное пособие. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 148 с.

Кумжи, радужная форель, гольцы и перспективы их использования в озерах Северо-Запада России. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 108 с. (Совместно с С. П. Китаевым, В. Г. Михайленко.)

Оценка состояния и динамика популяции ряпушки Сямозера // Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами. М.: Т-во науч. изд. КМК. С. 285–290. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Состояние экосистемы Вашозера при вселении сиговых рыб // Труды Карельского научного центра РАН. Биогеография Карелии. Вып. 7. С. 64–72. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Т. А. Иешко, С. А. Павловским, Я. А. Кучко.)

2006. Итоги вселения сиговых рыб в Вашозеро // Вопросы ихтиологии. Т. 46, № 2. С. 219–223. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Методы оценки биогенной нагрузки от форелевых ферм на водные экосистемы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 39 с. (Совместно с С. П. Китаевым, О. П. Стерлиговой.)

Мунозеро и его состояние // Труды Карельского научного центра РАН. Биогеография Карелии. Природа заповедника «Кивач». Вып. 10. С. 34–39. (Совместно с С. П. Китаевым, М. В. Брызгиным, В. Н. Павловым, Я. А. Кучко, В. В. Хренниковым.)

2007. Горбуша. Ерш // Карелия. Энциклопедия. Т. 1. Петрозаводск: ПетроПресс. С. 260, 328.

Охрана окружающей среды при выращивании форели в Карелии // Рыбоводство и рыбное хозяйство. № 2. С. 9–16. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

2008. Гидроэкология разнотипных озер южной Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 92 с. (Совместно с С. П. Китаевым, Я. А. Кучко, С. А. Павловским.)

Морская кумжа в водоемах Европейского Севера // Труды Карельского научного центра РАН. Вып. 12. С. 25–27. (Совместно с С. П. Китаевым.)

Результаты вселения леща в Мунозеро (южная Карелия) // Рыбоводство и рыбное хозяйство. № 4. С. 13–15. (Совместно с Я. А. Кучко.)

2009. Виды-вселенцы в водных экосистемах Карелии // Вопросы ихтиологии. Т. 49, № 3. С. 372–379. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Налим. Окунь. Морские рыбы // Карелия. Энциклопедия. Т. 2. Петрозаводск: ПетроПресс. С. 237–238, 258, 304.

Распространение судака в водоемах Карелии // Вопросы ихтиологии. Т. 40, № 4. С. 558–561. (Совместно с О. П. Стерлиговой, А. А. Рюкшиевым.)

2010. Фауна водных экосистем // Мониторинг и сохранение биоразнообразия таежных экосистем Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 79–104. (Совместно с О. П. Стерлиговой, В. Я. Первозванским, Ю. А. Шустовым, С. П. Китаевым.)

Некоторые заповедные водоемы Карелии и их рыбное население // Мониторинг и сохранение биоразнообразия таежных экосистем Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 295–305. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Ю. А. Шустовым, В. Я. Первозванским, С. П. Китаевым.)

Сравнительная характеристика многотычинковых сигов *Coregonus lavaretus* (Coregonidae) Сямозера и Тумасозера // Вопросы ихтиологии. Т. 50, № 3. С. 427–432. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Д. С. Савосиным.)

2011. Активность лизосомальных протеиназ в органах щук (*Esox lucius* L), отловленных из озер с различной антропогенной нагрузкой // Труды Карельского научного центра РАН. № 3. С. 69–72. (Совместно с М. Ю. Крупновой, Н. Н. Немовой.)

Оценка состояния сигов *Coregonus lavaretus* L., обитающих в хвостохранилище горно-обогатительного комбината, по некоторым биохимическим и молекулярно-генетическим показателям // Труды Карельского научного центра РАН. № 3. С. 137–145. (Совместно с М. В. Чуровой, О. В. Мещеряковой, Н. Н. Немовой.)

Сиг. Судак // Карелия. Энциклопедия. Т. 3. Петрозаводск: ПетроПресс. С. 88–89, 146. (Совместно с В. Я. Первозванским, О. П. Стерлиговой.)

Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании радужной форели // Поволжский экологический журнал. № 3. С. 386–393. (Совместно с О. П. Стерлиговой, С. П. Китаевым и др.)

Сравнительная биологическая характеристика судака *Sander lucioperca* озер Сямозера и Суоярви в связи с акклиматизацией // Вопросы рыболовства. Т. 12, № 3(47). С. 447–456. (Совместно с О. П. Стерлиговой, А. А. Рюкшиевым.)

2012. Байкальский бокоплав *Gmelinoides fasciatus* как кормовой объект литоральной зоны Онежского озера // Вопросы рыболовства. Т. 13, № 1(49). С. 35–40. (Совместно с Я. А. Кучко.)

Биота северных озер в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 12–26, 41–47, 55–58. (Совместно с П. А. Лозовиком, Я. А. Кучко, С. А. Павловским, О. П. Стерлиговой.)

Особенности популяционной биологии цестод рода *Triaenophorus* в естественных и техногенно трансформированных водоемах // Паразитология. Т. 46, № 6. С. 434–443. (Совместно с Е. П. Иешко, Л. В. Аникиевой, Д. И. Лебедевой.)

Особенности численности и структуры популяции *Proteocephalus longigolis* (Zeder 1800) (Cestoda: Proteocephalidae) – массового паразита сигов *Coregonus lavaretus* L. в условиях техногенного загрязнения водоема // Известия РАН. Сер. биол. № 4. С. 446–452. (Совместно с Л. В. Аникиевой, Е. П. Иешко и др.)

Рыбное население пресноводных экосистем Карелии в условиях их хозяйственного освоения: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: ИПЭЭ РАН. 44 с.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620647 «Редкие и охраняемые виды рыб в водоемах Карелии». Авторы: Первозванский В. Я., Савосин Д. С., Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В. Дата гос. регистрации 29.06.2012.

Сиг Костомукшского хвостохранилища в условиях техногенного загрязнения // Экология. № 4. С. 298–303. (Совместно с Н. Н. Немовой, Е. П. Иешко, О. В. Мещеряковой и др.)

Состояние некоторых водоемов северной Карелии и их использование для товарного выращивания форели // Труды Кольского научного центра РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 2. С. 39–45. (Совместно с О. П. Стерлиговой, С. П. Китаевым.)

Состояние популяций корюшки *Osmerus eperlanus* Выгозера и Сямозера, сформировавшихся в процессе саморасселения // Вопросы ихтиологии. Т. 52, № 3. С. 358–364. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Сравнительная биологическая характеристика судака *Sander lucioperca* (L.) в Онежском озере и Выгозере // Биология внутренних вод. Т. 5, № 2. С. 55–60. (Совместно с О. П. Стерлиговой, А. А. Рюкшиевым.)

2013. Гидробиоценозы Костомукшского водохранилища (бассейн Белого моря) в условиях техногенного загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 15, № 3(3). С. 916–920. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, С. А. Павловским.)

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013621294 «Комплекс морфометрических и биохимических показателей некоторых пресноводных видов рыб из техногенного водоема (модельный объект: водохранилище Костомукшского горно-обогательного комбината, Республика Карелия». Авторы: Суховская И. В., Борвинская Е. В., Васильева О. Б., Вдовиченко Е. А., Высоцкая Р. У., Ильмаст Н. В., Канцерова Н. П., Крупнова М. Ю., Кяйвяряйнен Е. И., Лысенко Л. А., Мещерякова О. В., Немова Н. Н., Рипатти П. О., Смирнов Л. П., Стерлигова О. П., Чурова М. В., Назарова М. А. Дата гос. регистрации 03.10.2013.

2014. Зеленый пояс Фенноскандии. Рыбы. Петрозаводск: КарНЦ РАН. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Зоопланктон как показатель состояния экосистемы озера Каменное // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 6. С. 2–26. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко.)

Разнообразие водных экосистем Зеленого пояса Фенноскандии (Республика Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. № 6. С. 115–121. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Рыбное население особо охраняемых территорий Республики Карелия // Вопросы ихтиологии. Т. 54, № 6. С. 717–725. (Совместно с О. П. Стерлиговой, В. Я. Первозванским.)

Состояние биоты озера Каменное (северная Карелия) // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 16, № 1(4). С. 972–977. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, С. А. Павловским.)

Состояние пресноводной экосистемы при товарном выращивании радужной форели в озере Верхнее Пулонгское (северная Карелия) // Вопросы рыболовства. Т. 16, № 1. С. 126–132. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, Е. С. Савосиным.)

2015. Водные экосистемы особо охраняемых территорий Карелии // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 17, № 6. С. 299–303. (Совместно с Я. А. Кучко, Н. П. Милянчуком.)

Жизненный цикл рыб. Учебное пособие. Петрозаводск: ПетрГУ. 35 с.

Зоопланктон водоемов верхнего течения системы реки Кенти (северная Карелия) в условиях длительного промышленного загрязнения // Известия РАН. Сер. биол. № 5. С. 552–560. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко.)

Зоопланктон озера Каменного (Республика Карелия) // Труды государственного природного заповедника «Костомукшский». Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 80–85. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко.)

Особенности воспроизводства пресноводной формы атлантического лосося в озерно-речной системе реки Шуя // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 17, № 6. С. 87–90. (Совместно с С. И. Ивановым, И. Л. Щуровым, В. А. Широковым, И. А. Тыркиным.)

Паразиты плотвы *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758) в условиях техногенной трансформации водоема // Паразитология. Т. 79, № 5. С. 352–364. (Совместно с Е. П. Иешко, Д. И. Лебедевой, Л. В. Аникиевой, Г. А. Яковлевой.)

Питание рыб. Учебное пособие. Петрозаводск: ПетрГУ. 17 с. (Совместно с Д. С. Савосиным, Я. А. Кучко.)

Результаты вселения сиговых видов рыб в водоемы Карелии // Вода: химия и экология. № 12. С. 83–88. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Случаи инфекционного заболевания щук (*Esox lucius*) в озере Каменное (бассейн Белого моря) // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. № 3(27). С. 26–33. (Совместно с А. Н. Паршуковым, Е. П. Иешко, Л. Н. Юхименко, А. А. Дружининой, С. В. Тарховым.)

Эффективность выращивания радужной форели в условиях садкового хозяйства // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 8(153). С. 42–45. (Совместно с С. В. Матросовой, М. Э. Хуобонен, М. С. Бомбиной.)

2016. Динамика популяции европейской ряпушки *Coregonus albula* Сямозера (Республика Карелия) // Сибирский экологический журнал. № 2. С. 177–183. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

К вопросу о дифференциации экологических форм/подвидов сига *Coregonus lavaretus* озера Каменного // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 4(157). С. 42–53. (Совместно с Д. С. Сендеком, А. Ф. Титовым, С. А. Абрамовым, Е. И. Зуйковой, Н. А. Бочкаревым.)

Круглоротые и рыбы пресных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 224 с. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Д. С. Савосиным.)

Методы сбора и обработки проб зоопланктона на пресноводных водоемах. Учебное пособие. Петрозаводск: ПетрГУ. 26 с. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко.)

Окунь *Perca fluviatilis* (Percidae) разнотипных водоемов Карелии // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 2(155). С. 57–62. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Д. С. Савосиным.)

Популяционные показатели сиговых рыб озера Гимольского (Карелия) // Вестник рыбохозяйственной науки. Т. 3, № 4(12). С. 35–44. (Совместно с Д. С. Савосиным, О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, Н. П. Милянчуком, Д. С. Беляевым.)

Распространение и условия обитания многотычинкового сига *Coregonus lavaretus* (L.) водоемов Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. № 4. С. 48–58. (Совместно с Д. С. Савосиным, О. П. Стерлиговой.)

Результаты вселения новых видов рыб в озеро Мунозеро (южная Карелия) // Российский журнал биологических инвазий. № 3. С. 39–46. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Садковое форелеводство Республики Карелия (современная ситуация и перспективы развития) // Рыбоводство и рыбное хозяйство. № 9(129). С. 8–13. (Совместно с Т. Ю. Кучко.)

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620963 «Промысловые рыбы пресноводных водоемов Карелии». Авторы: Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Савосин Д. С. Дата гос. регистрации 19.07.2016.

2017. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. № 10. С. 45–63. (Совместно с З. И. Слуковским, И. В. Суховской, Е. В. Борвинской, М. А. Гоголевым.)

Динамика популяции инвазийного вида корюшки *Osmerus eperlanus* в Сямозере (южная Карелия) // Вопросы ихтиологии. 2017. Т. 57, № 5. С. 576–584. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Зоопланктон как кормовая база европейской ряпушки шхерного района северной части Ладожского озера // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 2(163). С. 39–45. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко, Н. П. Милянчуком.)

Мониторинг экосистемы озера Гимольского (Республика Карелия) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета.

№ 4(165). С. 34–38. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко, Д. С. Беляевым, Н. П. Милянчуком.)

2018. Биогеохимические аспекты загрязнения водоемов урбанизированных территорий в Республике Карелия на примере окуня (*Perca fluviatilis*) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 3(172). С. 42–51. (Совместно с Д. Г. Новицким, З. И. Слуковским, И. В. Суховской.)

Биологические показатели сиговых видов рыб озера Тулос (западная Карелия) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 8(177). С. 27–32. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Н. П. Милянчуком.)

Гидробиоценозы озера Пандозеро (заповедник «Кивач», Карелия) // Вода: химия и экология. № 7–9. С. 119–126. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко.)

Липиды тканей рыб из акваторий Онежского озера с разной степенью антропогенного загрязнения // Труды Карельского научного центра РАН. № 6. С. 95–102. (Совместно с О. Б. Васильевой, М. А. Назаровой, Н. Н. Немовой.)

Питание молоди атлантического лосося *Salmo salar* L. и ее пищевые отношения с другими видами рыб в реках бассейна Баренцева и Белого морей (Кольский полуостров) // Труды Карельского научного центра РАН. № 5. С. 65–78. (Совместно с М. Ю. Алексеевым, А. М. Николаевым, А. В. Зубченко, Е. Н. Распутиной, А. Г. Легун, Ю. А. Шустовым.)

Планктонные сообщества озера Охтанъярви (северо-западная Карелия) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 8(177). С. 33–37. (Совместно с Т. Ю. Кучко, Я. А. Кучко.)

Рыбное население малых водоемов бассейна Онежского озера и перспективы их использования // Труды Карельского научного центра РАН. № 10. С. 96–104. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Н. П. Милянчуком.)

Современное состояние популяции ряпушки *Coregonus albula* Гимольского озера (западная Карелия) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. № 3(172). С. 52–57. (Совместно с Д. С. Савосиным, О. П. Стерлиговой, Е. С. Савосиным, Н. П. Милянчуком.)

Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 127 с. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, С. Ф. Комулайненом, Е. С. Савосиным, И. А. Барышевым.)

Характеристика зоопланктона Сямозера (южная Карелия) по результатам многолетнего мониторинга // Известия РАН. Сер. биол.

№ 5. С. 557–564. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко.)

Экосистема Урозера и результаты вселения в водоем новых видов рыб // Российский журнал биологических инвазий. № 3. С. 62–69. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко.)

2019. Гидробиоценозы озера Тулос (юго-западная Карелия) // Самарский научный вестник. Т. 8, № 1(26). С. 54–58. (Совместно с Я. А. Кучко, Т. Ю. Кучко.)

Перспективы выращивания объектов аквакультуры в озерах Карелии // Вопросы рыболовства. Т. 20, № 2. С. 216–224. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, Е. С. Савосиным.)

Плотва *Rutilus rutilus* (L.) озерно-речной системы реки Кенти (бассейн Белого моря) // Труды Карельского научного центра РАН. № 5. С. 73–82. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Д. С. Савосиным.)

Рыбное население Сямозера в районе форелевого хозяйства // Труды Карельского научного центра РАН. № 11. С. 42–49. (Совместно с Н. П. Милянчуком, О. П. Стерлиговой, Е. Н. Распутиной, И. В. Филатовым.)

Ecological state of aquatic biocenoses in the streams of the Kola basin, Barents Sea // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 302. Art. 012022. (Совместно с М. Я. Alekseev, N. A. Bochkarev, D. S. Sendek.)

2020. Валаамский сиг – глубоководная экоформа *Coregonus lavaretus* в Ладожском озере: морфологический и паразитологический аспекты исследования // Успехи современной биологии. Т. 140, № 3. С. 306–312. (Совместно с Л. В. Аникиевой, Е. П. Иешко, С. Г. Соколовым.)

Красная книга Республики Карелия. Пресноводный лосось *Salmo salar* m. *sebago* (Girard, 1853). Обыкновенная (балтийская) кумжа *Salmo trutta* m. *lacustris* Linnaeus, 1758. Белгород: Константа, 2020. С. 356, 357.

Первые данные о рыбном населении озера Толпанъярви (западная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. № 12. С. 93–104. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Н. П. Милянчуком, Д. С. Савосиным, Е. С. Савосиным.)

Рыбное население водоемов системы р. Кенти в условиях длительного промышленного загрязнения (западная Карелия) // Успехи современной биологии. Т. 140, № 4. С. 404–414. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Current state of Atlantic salmon populations in Karelia and updating its farm breeding technologies // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 539. Art. 012188. (Совместно с N. P. Milyanchuk, N. N. Nemova.)

Current state of sympatric whitefish from Lake Pyaozero, Kovda river basin, Karelia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 539. Art. 012195. (Совместно с D. S. Sendek, N. A. Bochkarev, D. S. Savosin, A. A. Borisovskaya.)

Influence of fish pond culture on the fish fauna of Ladoga Lake // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Vol. 941. Art. 012014. (Совместно с N. P. Milyanchuk, O. P. Sterligova.)

Morphological and Genetic Variability of the Mass Whitefish Forms in Lake Onega // KnE Life Sciences. P. 141–151. (Совместно с D. Sendek, E. Zuykova, N. Milyanchuk, D. Savosin, A. Borisovskaya, M. Alekseev, N. Bochkarev.)

The state of the lake-river system affected by mineral production // KnE Life Sciences. P. 152–161. (Совместно с Ya. Kuchko, T. Kuchko.)

2021. Байкальский бокоплав *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) // Инвазивные растения и животные Карелии. Петрозаводск: ПИН. С. 175–176. (Совместно с Я. А. Кучко, Д. С. Савосином.)

Бостонская коловратка *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) // Инвазивные растения и животные Карелии. Петрозаводск: ПИН. С. 173–174. (Совместно с Д. С. Савосиным, Я. А. Кучко.)

Горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) // Инвазивные растения и животные Карелии. Петрозаводск: ПИН. С. 182–184. (Совместно с Д. С. Савосиным.)

Мохнаторукий краб *Eriocheir sinensis* (Milne-Edwards, 1853) // Инвазивные растения и животные Карелии. Петрозаводск: ПИН. С. 179–181. (Совместно с Д. С. Савосиным, Я. А. Кучко.)

Радужная форель (микижа) *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) // Инвазивные растения и животные Карелии. Петрозаводск: ПИН. С. 184–189. (Совместно с Д. С. Савосиным.)

Результаты интродукции европейской ряпушки *Coregonus albula* в водоемы Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. № 12. С. 19–25. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620312 «Многотычинковый сиг водоемов Карелии». Авторы: Стерлигова О. П., Савосин Д. С., Ильмаст Н. В., Савосин Е. С. Дата гос. регистрации 20.02.2021.

Экосистема Маслозера и результаты вселения в водоем корюшки *Osmerus eperlanus* // Российский журнал биологических инвазий. № 2. С. 40–51. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, А. Н. Шаровым, Е. С. Савосиным, Д. С. Савосиным.)

Экосистема слабоизученного оз. Тикшозера (западная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. № 5. С. 45–56. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, Е. С. Савосиным.)

The current state of Atlantic salmon reproduction in the Keret River, White Sea basin, and how it can be increased // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 816. Art. 012008. (Совместно с М. Yu. Alekseev, A. V. Zubchenko, N. P. Milyanchuk, N. N. Nemova.)

2022. Мониторинговые исследования состояния Кондопожской губы Онежского озера в условиях ведения рыболовной деятельности // Вестник Российской сельскохозяйственной науки. № 2. С. 72–76. (Совместно с В. О. Артамоновым, О. П. Стерлиговой, Я. А. Кучко, Е. С. Савосиным, Н. П. Милянчуком, Д. С. Савосиным.)

Contribution of the Baikal amphipod to the feeding pattern of perch in the littoral zone of Lake Onega // Integration processes in the Russian and international research domain: experience and prospects. KnE Social Sciences. P. 62–70. (Совместно с Ya. A. Kuchko.)

Helminth communities of *Coregonus lavaretus* (Salmonidae: Coregoninae) from Lake Kamennoye (Kostomuksha State Nature Reserve, Russia) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. Vol. 7(3). P. 75–87. (Совместно с Е. Р. Ieshko, D. I. Lebedeva, L. V. Anikieva, V. V. Gorbach.)

Zooplankton and feeding of vendace introduced to Lake Vashozero, Onega Lake basin // Russian Journal of Biological Invasion. No. 4. P. 1–9. (Совместно с Ya. A. Kuchko.)

2023. Гидробиоценозы озера Малое Янисъярви (южная Карелия) в условиях товарного выращивания форели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Рыбное хозяйство. № 4. С. 26–33. (Совместно с Е. С. Савосиным, Я. А. Кучко, Д. С. Савосиным, Н. П. Милянчуком.)

Ихтиологические и гидробиологические исследования в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. № 3. С. 113–124. (Совместно с О. П. Стерлиговой.)

Aquatic biological resources of Kamennoye Lake, White Sea basin // AIP Conference Proceedings. Vol. 3011. Art. 020029. (Совместно с Ya. Kuchko.)

Fish fauna of North European Russia's water ecosystems affected by artificially-induced pollution // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol. 1154. Art. 012020. (Совместно с О. П. Sterligova.)

The ecosystem of Lake Tolpanjarvi, Western Karelia, preserved in the natural state // Biology Bulletin Reviews. Vol. 13, suppl. 3. P. 398–407. (Совместно с О. П. Sterligova, Ya. A. Kuchko, E. S. Savosin, D. S. Savosin.)

2024. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620660 «Виды-вселенцы (гидробионты) в водных экосистемах Карелии». Авторы: Савосин Д. С., Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Кучко Я. А. Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 09.02.2024 г.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024620661 «Макрозообентос Кондопожской губы Онежского озера». Авторы: Савосин Е. С., Ильмаст Н. В. Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 09.02.2024 г.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024623919 «Многолетняя динамика основных показателей зоопланктона озера Сямозера (южная Карелия)». Авторы: Кучко Я. А., Распутина Е. Н., Ильмаст Н. В. Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 08.08.2024 г.

Baikal amphipod (*Gmelinoides fasciatus*) and its contribution to the feeding of Ladoga Lake perch // BIO Web of Conferences. Vol. 95. Art. 02007. (Совместно с Е. Rasputina, N. Milyanchuk.)

Comparative analysis of population parameters of the vendace *Coregonus albula* (Salmonidae: Coregoninae) in Lake Samozero in different habitat conditions // Journal of Ichthyology. Vol. 64, no. 4. P. 598–606. (Совместно с О. П. Sterligova, L. V. Anikieva.)

Current state of the Pandozero Lake ecosystem, Kivach State Nature Reserve, Karelia // Ecosystem Transformation. Vol. 7(4). P. 162–173. (Совместно с О. П. Sterligova, Ya. A. Kuchko, E. S. Savosin, N. P. Milyanchuk.)

Current state of the population of a large-sized form of the vendace *Coregonus albula* (L.) introduced into Lake Pertozero, South Karelia // Russian Journal of Biological Invasions. Vol. 15, no. 4. P. 577–583. (Совместно с N. V. Ilmast, O. P. Sterligova, D. S. Savosin, N. P. Milyanchuk.)

The impact of fish farming on the Tarasmozero Lake ecosystem, Onega Lake basin // BIO Web of Conferences. Vol. 118. Art. 02002. (Совместно с N. Milyanchuk, Ya. Kuchko.)

Variability of some meristic features and polymorphism of the mitochondrial DNA Fragment, including the *nd1* Gene, of Whitefishes of the *Goregonus lavaretus* sensu lato group from water bodies of Northern Europe // Contemporary Problems of Ecology. Vol. 17, no. 6. P. 781–798. (Совместно с D. S. Sendek, N. A. Bochkarev, E. I. Zuykova, A. P. Novoselov, S. F. Titov, M. Yu. Alexeev, E. I. Boznak.)

2025. Влияние зарегулирования стока на рыбное население озера Пяозеро (Северная Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. № 8. С. 148–163. (Совместно с Д. С. Савосиным.)

Гидробиологические сообщества залива Кумоланлахти Ладожского озера в условиях рыболовной деятельности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Рыбное хозяйство. № 4. С. 25–33. (Совместно с Я. А. Кучко, Е. С. Савосиным, Д. С. Савосиным, Н. П. Милянчуком.)

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621582 «Популяция судака (*Sander lucioperca*) водных экосистем Карелии». Авторы: Савосин Д. С., Ильмаст Н. В. Дата гос. регистрации в Реестре баз данных 08.04.2025 г.

Biological indices of the population of introduced pike-perch (*Sander lucioperca*) into Lake Sundozero, South Karelia // Russian Journal of Biological Invasions. Vol. 16, no. 3. P. 415–420. (Совместно с Ya. A. Kuchko, N. P. Milyanchuk.)

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации
в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершенных оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учетом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегия серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляет за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылаются электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылаются электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (<http://journals.krc.karelia.ru/>).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – <http://transactions.krc.karelia.ru>; <http://journals.krc.karelia.ru>

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объем рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объем рисунков не должен превышать 1/4 объема статьи. Рукописи большего объема (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте <http://journals.krc.karelia.ru> либо высылаются на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

Для публикации в выпусках серии «Математическое моделирование и информационные технологии» рукописи принимаются в формате .tex (LaTeX 2ε) с использованием стилевого файла, который находится по адресу <http://transactions.krc.karelia.ru/section.php?id=755>.

Обязательные элементы рукописи располагаются в следующем порядке:

УДК курсивом в левом верхнем углу первой страницы; заглавие статьи на русском языке полужирным шрифтом; инициалы и фамилии авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название и полный почтовый адрес организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов аффилированным организациям; следует отметить звездочкой автора, ответственного за переписку, и указать в аффилиации его электронный адрес); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; указание источников финансирования выполненных исследований на русском языке.

Далее располагаются все вышеуказанные элементы на английском языке.

Текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение. Материалы и методы. Результаты и обсуждение. Выводы** либо **Заключение**); благодарности; списки литературы на языке оригинала (**Литература**) и на английском языке (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; можно указать телефон для контакта редакции с авторами статьи.

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать ее содержание и состоять из 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (как правило, не менее пяти). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце точка не ставится.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. На табличный и иллюстративный материал следует ссылаться так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т.д.), фотографии, помещаемые на наклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации.

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с картой более мелкого масштаба, где обозначен представленный на основной карте участок.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточную информацию для того, чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. Названия таксонов рода и вида даются курсивом. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательным годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicus* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все прочие сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. Располагаются после основного текста статьи отдельным абзацем, в котором авторы выражают признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и организациям, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ. При подаче статьи авторы должны раскрыть потенциальные конфликты интересов, которые могут быть восприняты как оказавшие влияние на результаты или выводы, представленные в работе. Если конфликт интересов отсутствует, следует об этом сообщить в отдельной формулировке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Источники располагаются в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами авторов ставится пробел.

REFERENCES. Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические записи источников оформляются согласно стилю Vancouver (см. примеры в ГОСТ Р 7.0.7-2021 и образцы ниже) и располагаются в алфавитном порядке. Заголовки русскоязычных работ приводятся на английском языке; для журналов и сборников, в которых размещены цитируемые работы, указывается параллельное английское наименование (при его наличии) либо русскоязычное наименование приводится в латинской транслитерации (вариант BSI) с переводом на английский язык. Прочие элементы библиографической записи приводятся на английском языке (русскоязычное название издательства транслитерируется). При наличии переводной версии источника в References желательным указать ее. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Для каждого источника обязательно указание DOI при его наличии; если приводится адрес интернет-страницы источника (URL), нужно указать дату обращения к ней.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 577.125.8

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ ОКСИДА АЗОТА В КРОВИ ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ И ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ АЛЛЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНОВ ACE (RS4340) И CYP11B2 (RS1799998)

Л. В. Топчиева^{1*}, О. В. Балан¹, В. А. Корнева², И. Е. Малышева¹

¹Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *topchieva@ya.ru

²Петрозаводский государственный университет (просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: артериальная гипертензия; оксид азота; индуцибельная синтаза оксида азота; ангиотензинпревращающий фермент; инсерционно-делеционный полиморфизм гена ACE; альдостеронсинтаза; ген CYP11B2

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0077).

L. V. Topchieva^{1*}, O. V. Balan¹, V. A. Korneva², I. E. Malysheva¹. THE NITRIC OXIDE LEVEL IN THE BLOOD OF HEALTHY PEOPLE AND PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION CARRYING DIFFERENT ALLELE VARIANTS OF THE ACE (RS4340) AND CYP11B2 (RS1799998) GENES

¹Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *topchieva@ya.ru

²Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

Аннотация на английском языке

Keywords: arterial hypertension; nitric oxide; inducible nitric oxide synthase; angiotensin-converting enzyme; insertion-deletion polymorphism of ACE genes; aldosterone synthase; CYP11B2 gene

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (0218-2019-0077).

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последствии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы

Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм ² Chloroplast cross-sectional area, μm ²	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм ² Mitochondria cross-sectional area, μm ²	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм ² Peroxisome cross-sectional area, μm ²	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mitochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.

Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)

Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus confuses* Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка 1 в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку 2 в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Dulldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews*. 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisesides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri*. *J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of *Incertella* Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000)*. Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

Литература:

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

Ссылки на интернет-ресурсы

Литература:

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайн-сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (дата обращения: 25.11.2006).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/> (accessed: 25.11.2006).

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

No. 1, 2026

ECOLOGICAL STUDIES Series

TABLE OF CONTENTS

REVIEWS

A. A. Rubaeva, E. G. Sherudilo, N. Yu. Shmakova, T. G. Shibaeva. THE IMPACT OF LONG POLAR DAYS ON PLANTS: RESEARCH HISTORY AND RESULTS	5
--	---

ORIGINAL ARTICLES

E. N. Zykova, S. B. Zikov, S. A. Iglovsky, E. Yu. Yakovlev. ASSESSMENT OF SNOW AND GROUND-WATER POLLUTION WITH HEAVY METALS AND URANIUM ISOTOPES IN THE ARKHANGELSK AGGLOMERATION (NORTHWEST RUSSIA)	18
--	----

N. V. Blagoveshchenskaya. ON THE ORIGIN OF BIRCH FORESTS ON THE VOLGA UPLAND	31
--	----

O. V. Artemeva, N. A. Pozdnyakova, I. A. Florinskii. DEVELOPMENT AND STUDY OF AN ALGORITHM FOR DECODING LARGE MIRE MASSIFS OF THE KARELIAN ISTHMUS, LENINGRAD REGION	44
--	----

T. A. Pristova, M. N. Miglovets, N. N. Goncharova, S. V. Zagirova. BIOMASS AND CARBON STOCKS OF WOODY VEGETATION OF A FEN IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE OF THE KOMI REPUBLIC . . .	56
--	----

A. V. Tkachenko. A STUDY OF THE ABUNDANCE DYNAMICS OF THE PONOI RIVER ATLANTIC SALMON <i>SALMO SALAR</i> L.	67
---	----

L. G. Isaeva, N. S. Ryabov. <i>PINUS CONTORTA</i> UNDER INDUSTRIAL AIR POLLUTION (MURMANSK REGION)	77
--	----

D. S. Konovalov, M. T. Syarki. THE STATE OF ZOOPLANKTON IN THE PELAGIC ZONE OF KONDOPOGA BAY, LAKE ONEGO, UNDER HUMAN IMPACT AND CLIMATE CHANGE	90
---	----

O. N. Rublevskaya, Yu. N. Burvikova, T. V. Guseva, M. V. Begak. SPECIFIC FEATURES OF THE ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION OF WATER SUPPLY AND WASTEWATER TREATMENT PLANTS: A CASE STUDY	106
---	-----

SHORT COMMUNICATIONS

T. G. Shibaeva, E. G. Sherudilo, A. A. Rubaeva, I. A. Levkin, A. F. Titov. EFFECT OF THE WHITE SEA <i>LAMINARIA DIGITATA</i> EXTRACT ON THE YIELD AND NUTRITIONAL VALUE OF RAPINI MICRO-GREENS	119
--	-----

DATES AND ANNIVERSARIES

Nikolai V. Il'mast (on the 60th anniversary)	129
--	-----

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	138
------------------------------------	-----

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 1, 2026

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 12 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор А. И. Мокеева
Компьютерная верстка Л. Э. Бюркланд

Подписано в печать 23.01.2026. Дата выхода 31.01.2026. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 16,4. Усл. печ. л. 16,8.
Тираж 100 экз. Заказ 884. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакция научного издания «Труды КарНЦ РАН»

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185030, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50