

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»



ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 8, 2024

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Петрозаводск
2024

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. ХЕЛЬТТЯ, 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; В. А. ИЛЮХА, 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.; Е. Н. РАСПУТИНА (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», 2024
© Институт биологии КарНЦ РАН, 2024
© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2024
© Институт леса КарНЦ РАН, 2024

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences



TRANSACTIONS

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

No. 8, 2024

ECOLOGICAL STUDIES

Petrozavodsk
2024

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 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.; V. A. ILYUKHA, 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.; E. N. RASPUTINA (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

8 issues a year

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, 2024
- © Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2024
- © Forest Research Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2024
- © Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2024

УДК 631.42 (470.22)

ИЗМЕНЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО РЕЖИМА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВ В КАРЕЛИИ

Л. Е. Назарова

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030)*

В условиях потепления климата оценка изменений температуры почвы как на поверхности, так и на различных глубинах важна не менее, чем оценка изменений температуры воздуха. В представленной статье на основании данных многолетних наблюдений на метеорологических станциях сети Росгидромета, расположенных на территории Республики Карелия, проанализированы изменения в температурном режиме почв. Оценены изменения средних годовых и месячных значений температуры за новый базовый период 1991–2020 гг. на глубинах 20, 80 и 160 см, суммы средних суточных значений температуры выше 10 °С в течение теплого периода года на глубине 20 см, продолжительность периода с температурой почвы, равной и ниже 0 °С, на глубине 20 см. Показано, что с начала XXI века почти на всей исследуемой территории отмечается рост температуры почвы во все месяцы года, изменились даты устойчивого перехода температуры почвы через значение 10 °С на глубине 20 см, увеличились суммы средних суточных значений температуры выше 10 °С в течение теплого периода.

Ключевые слова: температура почвы; климатические нормы; изменение термического режима; Карелия

Для цитирования: Назарова Л. Е. Изменение многолетнего режима температуры почв в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 5–13. doi: 10.17076/eco1989

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (ИВПС КарНЦ РАН, FMEN-2021-0003/121021700118-0, «Роль органического вещества и биогенных элементов в гидрохимическом режиме водных объектов гумидной зоны (на примере водоемов и водотоков Карелии): источники поступления и внутриводоемная трансформация»).

L. E. Nazarova. CHANGES IN THE LONG-TERM SOIL TEMPERATURE REGIME IN KARELIA

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

In the situation of warming climate, the variation of soil temperature at the surface and at different depths is important no less than that of air temperature. Based on long-term

data collected by weather stations of the Russian Hydrometeorological Service network located in Republic of Karelia, this paper presents an analysis of changes in the soil temperature regime. Changes in annual and monthly mean soil temperatures at 20, 80 and 160 cm depths, the sums of daily mean temperatures above 10 °C during the warm period at 20 cm depth, and duration of the period with soil temperatures equal to or below 10 °C at 20 cm depth were estimated for the new baseline period 1991–2020. It is demonstrated that soil temperatures have risen since the beginning of the 21st century in all months of the year nearly throughout the study area; the dates of stable soil temperature transition across 10 °C have changed, and the sums of mean daily temperatures above 10 °C in the warm period have increased.

Keywords: soil temperature; climatic normals; thermal regime change; Karelia

For citation: Nazarova L. E. Changes in the long-term soil temperature regime in Karelia. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 5–13. doi: 10.17076/eco1989

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (Northern Water Problems Institute KarRC RAS, FMEN-2021-0003/121021700118-0).

Введение

Первая формулировка понятия о почвенном климате была предложена П. И. Колосковым в 1946 году: «Климат почвы есть совокупность внутрисочвенных физических явлений годовой и суточной цикличности, влияющих на жизнь и продуктивность почвы и стоящих в зависимости от внешнего климата, почвенного субстрата и воздействия человека на почву и ее покров» [цит. по: Димо, Шульгин, 1985]. В Национальном атласе почв Российской Федерации климат почвы определен как водный, воздушный и температурный режимы почвы в многолетнем цикле [Национальный..., 2011]. В целом климат почвы можно кратко определить как многолетний режим температуры и влажности почвы, зависящий от комплекса природных факторов и производственной деятельности человека.

Термический режим почвы складывается под влиянием радиационного баланса, испарения с поверхности почвы, а также рельефа местности, снежного покрова и атмосферных осадков.

Для решения теоретических и практических задач, связанных с оценкой отклика земной поверхности на изменения климата, важное значение имеет температура почв. Она определяет функционирование наземных биогеоценозов, позволяя судить о чувствительности ландшафтов к антропогенному воздействию, изменению природной среды и климатическим флуктуациям [Национальный..., 2011]. Сведения о температурном режиме почв территории Карелии приведены в работе А. А. Романова [1961], разделы «Температура почвы» опубликованы в монографиях «Климат Петрозаводска» [1982] и «Климат Сортавалы» [1988]. Карта, отражающая

агроклиматическое районирование территории республики и основные характеристики районов, приведена в «Атласе Карельской АССР» [1989]. Осредненные данные опубликованы в Справочнике по климату СССР [1965] и Научно-прикладном справочнике по климату СССР [1988]. Современные изменения температуры воздуха в Карело-Кольском регионе исследуются довольно активно, чего нельзя сказать об изучении изменений температуры почвы. Температурный режим горных почв Кольской субарктики исследуют в Институте проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН по данным проводимых ими измерений [Зенкова, 2013; Зенкова, Штабровская, 2022; Штабровская, Зенкова, 2024 и др.]. Настоящая статья посвящена исследованию современного состояния температурного режима почвы территории Карелии по данным наблюдений на метеорологических станциях республики.

Материалы и методы

Начало наблюдений за температурой почв на метеорологических станциях Карелии относится к концу 1940-х – началу 1950-х гг. Для анализа и оценки изменений температурного режима почв республики в представленной работе использованы данные многолетних наблюдений на семи станциях сети Росгидромета РФ по СЗФО, расположенных на исследуемой территории (Петрозаводск, Сортавала, Реболы, Паданы, Калевала, Олонец, Медвежьегорск). Ряды многолетних наблюдений указанных станций представлены на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации –

Мирового центра данных (ВНИИГМИ МЦД). База данных содержит сведения с 1950-х до 2020 г. включительно. В работе использованы средние годовые, средние месячные значения, а также результаты ежедневных наблюдений. Для обработки климатических рядов применялись методы статистической обработки данных.

С 1 июля 2022 года подведомственные учреждения Росгидромета перешли на использование в оперативно-производственной практике климатических норм, рассчитанных за период 1991–2020 гг. В данном исследовании климатические нормы рассчитаны за два базовых периода: 1961–1990 и 1991–2020 гг. Новые климатические нормы сравниваются с предыдущим периодом для выявления тенденции изменения климата.

Результаты и обсуждение

Общая характеристика режима температуры поверхности почвы для исследуемой территории составлена по средним значениям, рассчитанным за период 1991–2020 гг. Температура поверхности почвы измеряется термометрами, которые в теплый период года устанавливаются на поверхности, освобожденной от растительного покрова, зимой – на поверхности снега. Термометры наполовину погружаются (горизонтально) в почву или снег, поэтому их показания соответствуют температуре поверхностного слоя 0,5–1,0 см, а не самой поверхности. Средняя годовая температура поверхности почвы по территории Карелии изменяется от 1,2–1,5 °С в северных районах до 3,0–3,5 °С на юге

республики, самые высокие значения средней годовой температуры почвы, до 4,3 °С, отмечены в районе г. Сортавала. В годовом ходе температуры поверхности почвы минимум приходится на январь–февраль, максимум – на июль. Средние многолетние значения температуры января в исследуемом районе составляют от –8,6 до –13,5 °С. Абсолютные минимальные значения по данным наблюдений на станциях севера Карелии составляют –48,0...–49,0 °С (МС Лоухи, Юшкозеро, 1966 г.), в центральных и южных районах республики –46,0 °С (МС Петрозаводск, Сортавала). Средняя многолетняя температура поверхности почвы самого теплого месяца (июля) изменяется от 18,4 до 19,7–20,5 °С с севера на юг территории республики. Абсолютные максимумы значений температуры отмечены разными станциями в разные годы и составляют 49,0–54,0 °С для различных районов территории Карелии. Температура почвы существенно зависит от механического состава. В теплое время года супесчаные и песчаные почвы теплее суглинистых из-за большой теплоемкости и влагоемкости последних [Справочник..., 1965].

Как было установлено ранее [Филатов и др., 2012; Назарова, 2014; Filatov et al., 2019; Резников, Исаченко, 2021 и др.], с конца XX века на территории Северо-Запада России практически во все годы отмечаются положительные отклонения значений средней годовой температуры воздуха от климатической нормы. Исследования многолетней динамики средней годовой температуры поверхности почвы показали, что эти тенденции характерны и для данной климатической характеристики (рис. 1).



Рис. 1. Средние годовые значения температуры поверхности почвы, °С, в 1950–2020 гг.

Fig. 1. Annual mean surface soil temperature, °C, 1950–2020

Сравнение средних за два стандартных периода расчета значений годовой температуры воздуха и поверхности почвы (табл. 1) позволило сделать следующие выводы. Современные климатические нормы выше предыдущих как для первого, так и для второго параметра. Как для воздуха, так и для поверхности почвы рост средних многолетних значений составил 1,2–1,4 °С.

Температура почвы на различных глубинах испытывает значительно меньшие колебания от года к году, чем температура поверхности почвы и прилегающих слоев атмосферы. Однако и на глубинах до 320 см отмечено значительное повышение температуры с начала XXI века (рис. 2).

Ранее установлено [Филатов и др., 2012; Назарова, 2014; Filatov et al., 2019; Резников, Исаченко, 2021], что наибольшее повышение

температуры воздуха характерно для зимних месяцев, особенно для января (средние значения за 1991–2020 гг. превышают предыдущие климатические нормы на 2,8–3,2 °С). Поэтому изменчивость температуры почвы именно в зимний период года вызывает особый интерес. Так же, как и для температуры воздуха, наибольшие изменения температуры поверхности почвы наблюдаются в зимний период года. В январе средние значения за 1991–2020 гг. были выше средних за предыдущий период на 2,6–3,1 °С (рис. 3). Для декабря и февраля отклонения составили 1,5–2,5 °С.

В марте, апреле и ноябре средние значения температуры поверхности почвы в основном находились в пределах климатической нормы. Летом и в начале осени почва нагревалась в среднем за каждый месяц на 0,5–1,7 °С больше, чем за период 1966–1990 гг.

Таблица 1. Средняя годовая температура воздуха и поверхности почвы, °С

Table 1. Annual mean air and surface soil temperatures, °С

Станция Stations	Температура воздуха Air temperature		Температура поверхности почвы Surface soil temperature	
	1961–1990	1991–2020	1961–1990	1991–2020
Калевала Kalevala	0,3	1,7	0,3	1,6
Реболы Reboly	1,1	2,4	0,7	2,2
Паданы Padany	1,6	2,8	1,4	2,7
Петрозаводск Petrozavodsk	2,4	3,7	2,6	3,8
Сортавала Sortavala	3,0	4,4	3,1	4,3

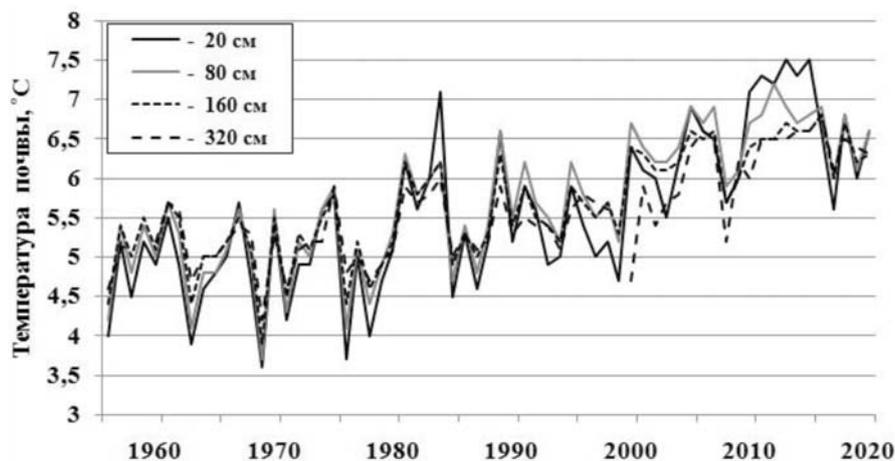


Рис. 2. Средняя годовая температура почвы на разных глубинах, МС Петрозаводск, 1956–2020 гг.

Fig. 2. Annual mean soil temperature at different depths, Petrozavodsk, 1956–2020

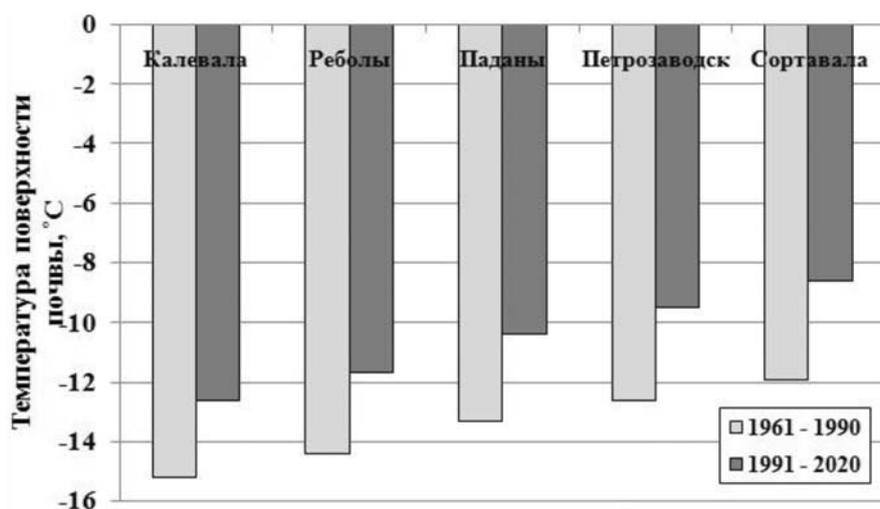


Рис. 3. Средняя январская температура поверхности почвы
Fig. 3. January mean surface soil temperature

На глубинах температура почвы измеряется ртутными термометрами. Для определения температуры почвы на глубинах от 5 до 20 см служат коленчатые термометры Савинова. Измерения производят под оголенной поверхностью в теплый период года. Когда температура на глубине 5 см опускается ниже 0 °С, термометры убирают на зиму. В течение всего года наблюдения проводят на глубинах от 20 до 320 см под естественным покровом (летом – травостой, зимой – снег) при помощи вытяжных термометров. Измерения выполняют один раз в сутки. В нашем исследовании использованы данные ежедневных наблюдений на метеорологических станциях с 1961 по 2020 г.

на глубине 20, 80 и 160 см. В результате проведенного анализа получены следующие результаты. Значения средней годовой температуры почвы на указанных глубинах в последнее тридцатилетие превышают средние значения за предыдущий базовый период на 0,3–0,6 °С в северных и центральных районах республики и на 0,8–1,0 °С в южных районах (табл. 2).

Во внутригодовом распределении наибольшие значения средней месячной температуры почвы отмечаются на глубине 20 см в июле, 80 и 160 см в августе и составляют от 15 до 17 °С (1991–2020 гг.) (табл. 3). В теплый период года средняя за 1991–2020 гг. температура почвы на всех глубинах устойчиво превышает

Таблица 2. Средняя годовая температура почвы на разных глубинах под естественным покровом, °С
Table 2. Annual mean soil temperature at different depths under natural cover, °С

Станция Stations	Почва Soil	1961–1990 гг.			1991–2020 гг.		
		20 см 20 cm	80 см 80 cm	160 см 160 cm	20 см 20 cm	80 см 80 cm	160 см 160 cm
Калевала Kalevala	Подзолисто-глеявая супесчаная Podzolic-gley sabulous	4,2	4,1	4,2	4,8	4,7	5,0
Реболы Reboły	Слабоподзолистая песчаная Low podzolic sandy	4,7	4,7	-	4,8	5,1	-
Медвежьегорск Medvezhegorsk	Дерново-подзолистая песчаная Sod-podzolic sandy	5,5	5,8	5,9	6,1*	6,4*	6,5*
Петрозаводск Petrozavodsk	Дерново-подзолистая супесчаная Sod-podzolic sabulous	5,1	5,2	5,3	6,3	6,3	6,1
Олонец Olonets	Подзолистая суглинистая Podzolic loamy	5,8	5,8	5,7	6,3*	6,1*	6,1*
Сортавала Sortavala	Подзолистая суглинистая Podzolic loamy	5,5	5,6	5,6	6,4	6,4	6,2**

Примечание. *Рассчитано за период 1991–2011 гг., **рассчитано за период 1991–2014 гг.
Note. * Calculated for the period 1991–2011, ** calculated for the period 1991–2014

Таблица 3. Средняя месячная температура почвы на разных глубинах (°С) по данным наблюдений МС Калевала и Петрозаводск за 1991–2020 гг.

Table 3. Annual mean soil temperature at different depths (°C). Observational data from MS Kalevala and Petrozavodsk, 1991–2020

Месяц Month	Калевала Kalevala			Петрозаводск Petrozavodsk		
	20 см 20 cm	80 см 80 cm	160 см 160 cm	20 см 20 cm	80 см 80 cm	160 см 160 cm
I	-1,0	0,9	3,2	0,0	1,4	2,8
II	-1,1	0,5	2,7	-0,2	0,9	2,1
III	-0,7	0,4	2,3	-0,1	0,7	1,7
IV	-0,1	0,5	2,0	0,5	0,8	1,3
V	3,8	1,9	2,1	6,8	4,4	3,0
VI	11,7	8,0	4,8	13,4	10,2	7,2
VII	15,4	11,9	8,0	16,8	13,9	10,6
VIII	14,2	12,5	9,6	16,3	14,9	12,6
IX	9,8	10,1	9,1	12,3	12,7	12,0
X	4,4	6,1	7,3	6,9	8,7	9,6
XI	0,9	2,9	5,3	2,4	4,5	6,4
XII	-0,3	1,6	4,0	0,6	2,4	4,1

средние многолетние значения предыдущего базового периода – на 0,5–1,0 °С в северных районах Карелии и на 1,3–1,8 °С в южных. По данным МС Петрозаводск и Сортавала, климатические нормы для мая выросли на 2,0 °С (на глубине 20 см). Одним из основных показателей тепловых ресурсов почвы являются суммы средних суточных значений температуры выше 10 °С на глубине 20 см [Национальный..., 2011]. Для территории Карелии они увеличиваются с севера на юг и ранее изменялись в пределах от 1300 до 1500 °С (по средним значениям за 1961–1990 гг.). Как было показано выше, температурный режим почв изменился в настоящее время. Ранее средняя суточная температура почвы на глубине 20 см устойчиво переходила через 10 °С в сторону повышения в первую декаду июня в южных районах Карелии и к середине второй декады июня в северных районах. Продолжительность периода с температурой выше 10 °С составляла 90 дней на севере и 110 дней на юге. Даты окончания изменялись с севера на юг от конца первой до начала третьей декады сентября. В настоящее время даты начала указанного периода смещены на более ранние сроки, окончания – на более поздние, в результате чего продолжительность периода с температурой выше 10 °С увеличилась на одну неделю в северных районах Карелии и на две недели – в южных. Это позволяет почве на глубине 20 см накопить от 1400 до 1800 °С в течение летнего периода года. Начиная с 2010 года в районах Петрозаводска и Сортавалы суммы средних суточных значений

температуры почвы на указанной глубине практически ежегодно превышали 2000 °С.

Самая низкая средняя месячная температура почвы на глубине 20 см характерна для февраля (до -1,5 °С в северных районах), на глубине 80 см – для марта (-0,3 ...+1,0 °С), 160 см – для апреля (1,2–2,2 °С) (табл. 3).

Как показано в [Национальный..., 2011], глубина промерзания почвы зависит от многих факторов: температуры воздуха, снежного и растительного покрова, типа почвы и ее гранулометрического состава, влажности почвы, рельефа местности, хозяйственной деятельности человека. Торфяные почвы промерзают меньше, чем суглинистые, суглинистые – меньше, чем песчаные. При одной и той же температуре почва с большим содержанием влаги имеет меньшую глубину промерзания [Справочник..., 1965]. Глубина проникновения температуры 0 °С в почву больше глубины промерзания почвы. По данным ежедневных измерений температуры почвы на глубине 20 см с 1961 по 2020 г. рассчитано число дней с температурой почвы, равной или ниже 0 °С. Анализ полученных результатов показал, что в северных районах Карелии продолжительность периода с указанной температурой почвы практически не изменилась (табл. 4, Калевала). При этом с начала XXI века в холодный период года чаще наблюдается суточная температура 0...-1,0 °С. Для южных районов республики характерно значительное сокращение дней с температурой почвы ≤ 0 °С. В отдельные годы в течение всего холодного периода на глубине 20 см температура ни разу

Таблица 4. Число дней с температурой почвы ≤ 0 °C на глубине 20 см

Table 4. Number of days with soil temperature ≤ 0 °C at a depth of 20 cm

Месяцы Month	Калевала Kalevala		Петрозаводск Petrozavodsk	
	1961–1990	1991–2020	1961–1990	1991–2020
XI	6	5	1	1
XII	18	16	12	5
I	25	26	24	14
II	25	26	24	20
III	28	27	27	22
IV	20	20	20	13
V	5	3	2	1
Год Year	127	123	110	76

не опускалась до нуля градусов. Нужно отметить, что если начиная с 50-х годов XX до начала XXI в. это происходило крайне редко (например, по данным МС Петрозаводск, это зимние сезоны 1981/82 или 1988/89 гг.), то из 20 лет нового века таких зим было отмечено шесть. Причем пять из них – подряд, с зимы 2010/11 до зимы 2014/15 гг. Для района Петрозаводска начиная с 2000 г. промерзание до $-1,0 \dots -1,2$ °C на глубине 20 см отмечалось лишь дважды – в 2016 и 2019 годах. Для района города Сортавала [Климат..., 1988] глубина промерзания почвы ранее составляла в среднем от 30 см в январе до 42 см в марте. Однако в течение 2000–2021 гг., по данным ежедневных измерений, на глубине 20 см отрицательные значения температуры наблюдались не ежегодно и составляли в основном от $-0,1$ до $-0,5$ °C. Минимальное значение температуры почвы на указанной глубине ($-2,7$ °C) отмечено в январе 2016 г.

В монографии «Климат Петрозаводска» [1982] приводятся сведения о том, что на глубине 80 см отрицательные значения температуры в районе Петрозаводска наблюдаются с февраля по апрель. Средняя глубина проникновения температуры 0 °C составляет в феврале 94 см, в марте 105 см, в апреле 95 см. По данным ежедневных наблюдений МС Петрозаводск, с начала XXI века до настоящего времени не отмечено ни одного дня с нулевой или отрицательной температурой почвы на глубине 80 см.

В работе [Назарова и др., 2022] на примере водосбора реки Шуя (Республика Карелия) показано, что снижение промерзания почвы в зимний период года могло явиться одним из факторов, повлекших в течение последних 10 лет увеличение зимнего стока реки и поступление железа с речными водами в Петрозаводскую губу Онежского озера.

Выводы

Анализ данных многолетних наблюдений за температурой почвы на метеорологических станциях Карелии позволяет сделать следующие выводы. С конца XX века на исследуемой территории повсеместно отмечается повышение значений средней годовой температуры поверхности почвы. Современные климатические нормы этой характеристики превышают нормы предыдущего базового периода на $1,2-1,4$ °C. Наибольшее повышение температуры поверхности почвы характерно для зимних месяцев, особенно для января (средние многолетние значения выросли на $2,6-3,1$ °C). Нормы средних годовых значений температуры почв на глубинах также увеличились – на $0,3-0,6$ °C в северных и центральных районах республики и на $0,8-1,0$ °C в южных районах. Отмечается смещение дат устойчивого перехода температуры почвы на глубине 20 см через 10 °C, в результате чего продолжительность периода с температурой выше 10 °C увеличилась на одну неделю в северных районах Карелии и на две недели в южных. Это позволяет почве накапливать большие суммы средних суточных значений температуры выше 10 °C. В холодный период года для южных районов Карелии характерно значительное сокращение числа дней с температурой почвы, равной или ниже 0 °C на глубине 20 см. Продолжительность периода с указанными значениями температуры почвы в северных районах республики осталась без изменений. Таким образом, изменение температурного режима территории Карелии подразумевает не только повышение температуры воздуха, но и рост температуры почвы от поверхности до глубины 160 см.

Литература

Атлас Карельской АССР / Ред. А. Г. Дуров [и др.]. М.: ГУГК, 1989. 40 с.

Димо В. Н., Шульгин А. М. История развития, современное состояние и задачи исследований климата почв // Климат почв: Сб. науч. тр. Пущино: НЦБИ, 1985. С. 3–7.

Зенкова И. В. Летняя динамика температуры в горных почвах заповедника «Пасвик» // Вестник МГТУ. Труды Мурманского гос. технического университета. 2013. Т. 16, № 4. С. 715–724.

Зенкова И. В., Штабровская И. М. Суточная и сезонная динамика температуры и активности фауны в почвенном ярусе заполярных лесов // Почвы – стратегический ресурс России. М.; Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2022. Ч. 2. С. 62–64.

Климат Петрозаводска / Под ред. Ц. А. Швер. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 212 с.

Климат Сортавалы / Под ред. Ц. А. Швер, Л. С. Раковой. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 117 с.

Назарова Л. Е. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии // Известия РГО. 2014. Т. 146, вып. 4. С. 27–33.

Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинин Н. М., Балаганский А. Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия РГО. 2022. Т. 154, № 1. С. 28–36. doi: 10.31857/S0869607122010086

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Часть 1–6. Вып. 3. Карельская АССР, Ленинградская, Новгородская, Псковская, Калининская и Смоленская области. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 693 с.

Национальный атлас почв Российской Федерации / Ред. С. А. Шоба. М.: Астрель, 2011. 632 с.

Резников А. И., Исаченко Г. А. Изменение климатических характеристик западной части тайги Европейской России в конце XX – начале XXI вв. // Известия РГО. 2021. Т. 153, № 1. С. 3–18. doi: 10.31857/S0869607121010055

Романов А. А. О климате Карелии: что необходимо знать работникам сельского хозяйства о климате Карельской АССР. 2-е изд., доп. Петрозаводск: Госиздат Карел. АССР, 1961. 140 с.

Справочник по климату СССР. Вып. 1. Архангельская и Вологодская области, Карельская и Коми АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 359 с.

Филатов Н. Н., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Семенов А. В., Анциферова А. Р. Изменение и изменчивость климата Европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика. Экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 80–94.

Штабровская И. М., Зенкова И. В. Температурные данные в экологическом мониторинге горных почв Кольской Субарктики // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 3. С. 105–120. doi: 10.17076/eco1758

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing

and in situ data // Inland Waters. 2019. Vol. 9. P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

References

Dimo V. N., Shul'gin A. M. History of development, current state and tasks of soil climate research. *Klimat pochv: Sbornik nauchnykh trudov = Soil climate: Proceedings*. Pushchino: NTsBI; 1985. P. 3–7. (In Russ.)

Durov A. G. et al. (eds.). Atlas of the Karelian ASSR. Moscow: GUGK; 1989. 40 p. (In Russ.)

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters*. 2019;9:130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Filatov N. N., Nazarova L. E., Georgiev A. P., Semenov A. V., Antsiferova A. R. Climate change and variability in the European North of Russia and their influence on water bodies. *Arktika. Ekologiya i ekonomika = Arctic. Ecology and Economics*. 2012;2(6):80–94. (In Russ.)

Handbook of the climate of the USSR. Iss. 1. Arkhangel'sk and Vologda Regions, Karelian and Komi ASSR. Part 2. Air and soil temperature. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1965. 359 p. (In Russ.)

Nazarova L. E., Isakova K. V., Kalinkina N. M., Balagansky A. F. The climate warming influence on the Shuya River winter runoff and the consequences for the zoobenthos of Lake Onego. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2022;154(1):28–36. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869607122010086

Nazarova L. E. Variability of average long-term air temperature values in Karelia. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2014;146(4):27–33. (In Russ.)

Reznikov A. I., Isachenko G. A. Change in climatic characteristics of the western part of the taiga of European Russia in the late XX – early XXI centuries. *Izvestiya RGO = Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2021;153(1):3–18. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869607121010055

Romanov A. A. On the climate of Karelia: what agricultural workers need to know about the climate of the Karelian ASSR. 2nd ed., add. Petrozavodsk: Gosizdat Karel. ASSR; 1961. 140 p. (In Russ.)

Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Part 1–6. Iss. 3. Karelian ASSR, Leningrad, Novgorod, Pskov, Kalinin and Smolensk Regions. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1988. 693 p. (In Russ.)

Shoba S. A. (ed.). National atlas of soils of the Russian Federation. Moscow: Astrel'; 2011. 632 p. (In Russ.)

Shtabrovskaya I. M., Zenkova I. V. Temperature data in ecological monitoring of the Kola Subarctic mountain soils. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2024;3:105–120. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1758

Shver Ts. A. (ed.). Climate of Petrozavodsk. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1982. 212 c. (In Russ.)

Shver Ts. A., Rakova L. S. (eds.). Climate of Sortavala. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1988. 117 p. (In Russ.)

Zenkova I. V., Shtabrovskaya I. M. Diurnal and seasonal dynamics of temperature and fauna activity in the soil layer of polar forests. *Pochvy – strategicheskii resurs Rossii = Soils – a strategic resource of Russia*. Pt. 2. Moscow-Syktuykar: IB FIC Komi NTs UrO RAN; 2022. P. 62–64. (In Russ.)

Zenkova I. V. Summer temperature dynamics in the mountain soils of the Pasvik Nature Reserve. *Vestnik MGTU: Trudy Murmanskogo gos. tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of MSTU: Scientific Journal of Murmansk State Tech. University*. 2013;16(4):715–724. (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 06.11.2024; принята к публикации / accepted: 25.11.2024.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Назарова Лариса Евгеньевна

канд. геогр. наук

e-mail: larianazarov@yandex.ru

CONTRIBUTOR:

Nazarova, Larisa

Cand. Sci. (Geogr.)

УДК [582.632.1 : 581.321.1 : 577.115.3] : [581.543.2 + 581.543.5] (470.22 + 571.56)

ОСОБЕННОСТИ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА ГЛИКОЛИПИДОВ В ПОЧКАХ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩЕЙ В РАЗНЫХ ПРИРОДНО- КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Л. В. Ветчинникова^{1*}, А. Ф. Титов², Т. Д. Татарина³

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

² Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

³ Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения РАН
(пр. Ленина, 41, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия, 677980)

Изучены особенности состава жирных кислот (ЖК) и активности ацил-липидных десатураз гликолипидов в почках березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающей на одной широте – 62° с. ш., но на разной долготе – 34° и 130° в. д., в Карелии и Якутии соответственно. Установлено, что независимо от места произрастания в зимне-весенний период в гликолипидах, входящих в состав мембран хлоропластов зачаточных органов, сформированных в почках, происходят сходные изменения. В частности, доля ненасыщенных ЖК, которые преобладают над насыщенными, увеличивается в период с января по май. Одновременно с этим повышаются значения коэффициента ненасыщенности и индекса двойной связи. В Карелии в период вынужденного покоя (январь–март) в ненасыщенных ЖК преобладали диеновые, а с повышением температуры воздуха (апрель–май) – триеновые ЖК. В Якутии наблюдалась такая же картина, но повышение доли триеновых ЖК отмечено только к началу вегетации (в мае), что очевидно связано с низкой температурой не только воздуха, но и корнеобитаемого слоя почвы в условиях многолетней мерзлоты. Выход деревьев из состояния вынужденного покоя сопровождался повышением активности ω 9- и ω 6-десатураз, о чем свидетельствовали высокие значения индексов, отражающих соответственно стеароил- (SDR) и олеоил- (ODR) десатуразные отношения. Резкое увеличение индекса LDR (линолеил-десатуразных отношений) к началу вегетации позволило предположить, что увеличение доли линоленовой ЖК (вследствие усиления активности ω 3-десатуразы) является одним из факторов повышения устойчивости тканей зачаточных побегов не только к перепадам температуры воздуха в весенний период, но и к изменению световых условий при распускании почек. Но если в условиях Карелии накопление линоленовой ЖК в гликолипидах зафиксировано уже в апреле, то в Якутии – только в мае. На основании полученных данных и анализа литературы авторы пришли к заключению, что в зимний период активность десатураз обусловлена главным образом общим физиологическим состоянием деревьев, а в весенний – фазой внутривисцерального развития зачаточных органов.

Ключевые слова: береза повислая; *Betula pendula* Roth; почки; адаптация; низкие отрицательные температуры; гликолипиды; жирные кислоты; десатуразы; Карелия; Якутия

Для цитирования: Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф., Татаринова Т. Д. Особенности жирнокислотного состава гликолипидов в почках березы повислой, произрастающей в разных природно-климатических условиях // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 14–26. doi: 10.17076/eco1990

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН, FMEN-2021-0018) и Института биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения РАН (FWRS-2021-0024).

L. V. Vetchinnikova^{1*}, A. F. Titov², T. D. Tatarinova³. FEATURES OF THE FATTY ACID COMPOSITION OF GLYCOLIPIDS IN BUDS OF SILVER BIRCH GROWING UNDER DIFFERENT NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS

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

² Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

³ Institute for Biological Problems of the Cryolithozone, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (41 Lenin Ave., 677980 Yakutsk, Russia)

The specific features of the fatty acid (FA) composition and activity of acyl-lipid desaturases in bud glycolipids were studied in silver birch (*Betula pendula* Roth) growing at the same latitude – 62° N but at different longitudes – 34° and 130° E – in Karelia and Yakutia, respectively. Studies showed that the changes happening in the winter-spring season in glycolipids within the chloroplast membranes of primordia developing inside buds were quite similar in both regions. To wit, the share of unsaturated FAs, which prevail over saturates FAs, grew from January through May. At the same time, the unsaturation index and the double bond index also increased. During the endogenous dormancy period in Karelia (January-March), unsaturated FAs were dominated by dienoic acids, and after a temperature rise (in April-May) by trienoic FAs. The pattern in Yakutia was the same, but the rise in the share of trienoic FAs took place only by the onset of the growing season (in May), which is obviously due to low temperatures of both the air and the root layer of soil in a permafrost region. Awakening from exogenous dormancy was accompanied by a rise in the activity of ω9- and ω6-desaturases, as evidenced by high values of the indices representing stearoyl- (SDR) and oleoyl- (ODR) desaturase ratios, respectively. A sharp rise in the LDR (linoleoyl-desaturase ratio) at the onset of the growing season suggests that an increase in the share of linolenic acid (induced by higher ω3-desaturase activity) is a factor that promotes the resistance of primordial shoot tissues both to abrupt air temperature variations in spring and to the change in the light conditions during bud break. Where in Karelia a rise in linolenic FA in glycolipids was observed already in April, in Yakutia in only happened in May. Having analyzed the new data and the literature, the authors have come to the conclusion that desaturase activity in winter is mainly governed by the overall physiological status of the tree, while the determinant in spring is the phase of primordia development inside the bud.

Keywords: silver birch; *Betula pendula* Roth; buds; adaptation; low negative temperatures; glycolipids; fatty acids; desaturases; Karelia; Yakutia

For citation: Vetchinnikova L. V., Titov A. F., Tatarinova T. D. Features of the fatty acid composition of glycolipids in buds of silver birch growing under different natural and climatic conditions. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 14–26. doi: 10.17076/eco1990

Funding. The research was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute KarRC RAS, FMEN-2021-0018) and the Institute for Biological Problems of the Cryolithozone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FWRS-2021-0024).

Введение

Древесные растения в течение своего длительного жизненного цикла постоянно подвергаются действию различных факторов внешней среды, и в первую очередь климатических. Среди последних наиболее сильное влияние оказывает температура, значительные колебания которой наблюдаются в течение суток, от месяца к месяцу, по сезонам и по годам. Однако в процессе длительной эволюции растения смогли приспособиться к этому, реагируя, например, на сезонные колебания температуры изменением сроков прохождения фенологических фаз [Grimberg et al., 2018]. При этом показано, что такого рода сдвиги более выражены на этапе весеннего развития растений по сравнению с осенним и чаще наблюдаются в условиях высоких широт Северного полушария, где средние температуры воздуха ниже по сравнению с Южным [Delgado et al., 2020]. Важно, что смещение сроков начала вегетации, вызванное, в частности, действием пониженных температур, на более поздние даты даже на несколько дней может существенно сокращать общую продолжительность вегетационного периода [Cook et al., 2021; Roslin et al., 2021].

Как показано в многочисленных исследованиях, устойчивость растений к продолжительному действию низких положительных и отрицательных температур формируется в результате комплекса различных структурных и физиолого-биохимических изменений в клетках и тканях [Трунова, 2007; Титов, Таланова, 2011; Theocharis et al., 2012; Strimbeck et al., 2015], в числе которых важная роль отводится жирнокислотному составу мембранных липидов [Los et al., 2013; Лось, 2014; He, Ding, 2020; Xiao et al., 2022]. Экспериментально доказано, что увеличение уровня ненасыщенных жирных кислот приводит к снижению температуры фазового перехода липидов из жидкокристаллического состояния в твердое и тем самым обеспечивает необходимую текучесть и функциональную активность мембран при отрицательных температурах воздуха [Grimberg et al., 2018; Hernández, Sejudo, 2021].

Изучению жирнокислотного состава липидов и их роли в реакции растений на действие факторов внешней среды посвящена обширная литература, однако в большинстве случаев такие работы проводятся на травянистых растениях, как правило, имеющих сельскохозяйственное значение [Попов и др., 2020]. Древесные растения изучены в этом плане гораздо хуже, хотя следует иметь в виду,

что крона у них находится относительно высоко над землей и в отличие от травянистых растений не имеет в зимний период защиты в виде снежного покрова. В имеющихся публикациях по изучению ЖК-состава липидов древесных растений работы выполнены преимущественно на хвойных видах [Алаудинова и др., 2010; Нохсоров и др., 2019]. Хотя в холодной и умеренной зонах Евразии широко представлены и лиственные породы, такие как, например, береза, которая благодаря высокой экологической пластичности формирует здесь мелколиственные леса или выступает в качестве примеси к хвойным породам [Ветчинникова, Титов, 2021]. При этом ее адаптационный потенциал может по-разному проявляться в неодинаковых природно-климатических условиях. Следует также иметь в виду, что у березы особо чувствительным к продолжительному действию низких температур органом являются почки, несущие зачаточные гофрированные листовые пластинки, мембраны хлоропластов которых представлены преимущественно гликолипидами.

Исходя из вышеизложенного целью данной работы явилось сравнительное изучение динамики жирнокислотного состава и активности ацил-липидных десатураз гликолипидов в зимне-весенний период в почках березы повислой, деревья которой произрастают в Карелии и Якутии, расположены на одной широте, но значительно удалены друг от друга в долготном направлении и находятся в существенно разных природно-климатических условиях.

Материалы и методы

Объектом исследования были деревья березы повислой *Betula pendula* Roth, произрастающие на территории Республики Карелия (северо-западная часть Евразии) и Республики Саха (Якутия) (северо-восточная часть Евразии). Материалом для исследований служили вегетативные почки и смешанные, несущие, соответственно, зачаточные органы только вегетативных побегов или одновременно вегетативных и генеративных (женских соцветий). Сбор образцов для исследования проводили в зимне-весенний период (с января по май) индивидуально с трех (одних и тех же в каждом регионе) деревьев, которые по внешним признакам являются типичными для данного вида и произрастают в местообитаниях, расположенных на одной широте – 62° с. ш., но удаленных друг от друга более чем на 5 тыс. км в направлении с запада (окрестности г. Петрозаводска, 34° в. д.) на восток (окрестности г. Якутска, 130° в. д.).

Оба региона, где проводилось исследование, имеют сходный фотопериод, но существенно различаются по температурно-влажностному режиму. В частности, в Карелии климат умеренно-континентальный, переходный к морскому, с возвратными потеплениями в зимний период и заморозками в весенний, а в Якутии – резко континентальный, со сверхнизкими зимними температурами (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), без возвратных потеплений, но с резкими перепадами дневной и ночной температуры в весенний период. Среднегодовое количество осадков в Карелии по сравнению с Якутией выше более чем в два раза [Filatov et al., 2019; Ананичева и др., 2021]. Дополнительным фактором, лимитирующим рост и развитие растений на территории Якутии, является многолетняя мерзлота. Климатические показатели в период сбора материала исследований в целом не отличались от среднесезонных (табл. 1).

Липиды из тканей (0,5 г сухой массы) извлекали смесью хлороформа и метанола (2:1 по объему) с добавлением воды. Для выделения гликолипидов (ГЛ) из суммарных липидов использовали колоночную хроматографию [Simola, Koskimies-Soininen, 1984; Piispanen, Saranpää, 2004]. Метилловые эфиры жирных кислот (ЖК) получали в присутствии ацетилхлорида и разделяли на газо-жидкостном

хроматографе «Хроматэк – Кристалл-5000 М.1» (Россия) с использованием капиллярной колонки HP-INNOWAX (50 м × 0,32 мм) при температурах: пламенно-ионизационного детектора – $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, термостата – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (изотерма), испарителя – $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости газа-носителя (азот) 50 мл/мин. ЖК идентифицировали сравнением времени удерживания со стандартными ЖК (Supelco 37 component Fame Mix, Германия), а также сопоставлением индекса эквивалентной длины цепи экспериментально полученных компонентов с известными [Сиймер и др., 1971; Nakamura et al., 2014]. Количественное определение ЖК проводили методом внутреннего стандарта (маргариновая кислота). Вычисляли содержание индивидуальных ЖК, а также их групп, объединенных по числу двойных связей в углеводородной цепочке: насыщенные (двойные связи отсутствуют) и ненасыщенные (с одной двойной связью – моноеновые, с двумя двойными связями – диеновые, с тремя двойными связями – триеновые).

Индекс двойной связи DBI (double bond index) и коэффициент ненасыщенности U/S (unsaturated/saturated, ненасыщенные/насыщенные ЖК) рассчитывали по формулам Лайонса с соавт. [Lyons et al., 1964]. Об активности $\omega 9$ -, $\omega 6$ - и $\omega 3$ -ацил-липидных десатураз, катализирующих введение двойных связей

Таблица 1. Некоторые характеристики климата Карелии и Якутии, на территории которых произрастает береза повислая [Климатические...]

Table 1. Some climatic characteristics of Karelia and Yakutia, where the silver birch grows [Climatic...]

Характеристика климата Climate characteristics	Карелия Karelia	Якутия Yakutia
Географические координаты Geographic coordinates	62°N, 34°E	62°N, 130°E
Тип климата Climate type	умеренно-континентальный, переходный к морскому moderate continental transitional to marine	резко континентальный extreme continental
Безморозный период (дни) Frost-free period (days)	120–130	78–126
Средняя температура воздуха, °C Average air temperature, °C		
годовая annual	+2,8...+3,3	-8,3...-8,8
в январе in January	-8,8...-10,2	-46,6...-48,5
в июле in July	+16,4...+16,9	+18,5...+21,8
Число дней с температурой воздуха Number of days with air temperature		
> +5 °C	159–165	109–128
> +10 °C	112–114	72–97
Годовое количество осадков, мм Annual precipitation, mm	550–750	173–293

в углеводородные цепи соответственно олеиновой (C_{18:1}), линолевой (C_{18:2}) и линоленовой (C_{18:3}) ЖК, судили по величине индексов, отражающих стеароил- (SDR), олеоил- (ODR) и линолеил- (LDR) десатуразные отношения, рассчитанные на основании содержания (% от суммы ЖК) компонентов типа C₁₈ [Jaworski, Stumpf, 1974; Алаудинова, Миронов, 2009; Розенцвет и др., 2012].

Анализ липидов выполнен с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Аналитическая лаборатория» Института леса ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук».

Обработку данных трех биологических и трех-пяти химических повторностей проводили с помощью общепринятых методов с использованием статистического пакета программ Microsoft Excel. В статье обсуждаются величины, являющиеся статистически достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Согласно полученным данным, в зимне-весенний период в ГЛ почек березы повислой ненасыщенные ЖК преобладали над насыщенными, но их сумма была выше в условиях Карелии (80,7–83,3 % от суммы ЖК) по сравнению с Якутией (63,8–74,7 %) (табл. 2). При этом в Карелии доля ненасыщенных ЖК хотя и незначительно, но повышалась с января по май, а насыщенных, напротив, плавно снижалась. В Якутии по мере выхода растений из состояния вынужденного покоя к началу вегетации в ГЛ также наблюдали увеличение ненасыщенных ЖК,

но здесь в марте их сумма была выше почти на 15 %, а в мае – на 11 % по сравнению с январем.

Рост ненасыщенных ЖК в составе ГЛ почек березы повислой в зимне-весенний период повлек за собой увеличение коэффициента ненасыщенности (U/S) и индекса двойной связи (DBI) (табл. 2). При этом значения U/S в изученный период были почти в 2 раза выше в Карелии по сравнению с Якутией, за исключением марта. Значения DBI оказались не только близкими, но и почти синхронно изменялись от января к маю независимо от места произрастания деревьев и фазы их развития.

Определенные особенности выявлены в соотношении и динамике моно-, ди- и триеновых ЖК в ГЛ. В частности, в период вынужденного покоя (январь–март) в почках березы повислой преобладали диеновые ЖК (рис. 1) независимо от места ее произрастания. В апреле в условиях Якутии доля диеновых ЖК сохранилась на том же уровне, а в Карелии существенно уменьшилась (в 1,8 раза) на фоне увеличения (в 2,2 раза) триеновых ЖК. Очевидно, низкая температура воздуха и более медленное оттаивание почвы в условиях многолетней мерзлоты сдерживают в весенний период начало активной деятельности корневой системы растений в Якутии. В результате начало вегетации деревьев, произрастающих на одной широте (62° с. ш.), но на разной долготе (34° и 130° в. д. в Карелии и Якутии соответственно), происходит в разные сроки (рис. 2). Согласно полученным данным, вегетация березы повислой в северо-западной части ее ареала по сравнению с северо-восточной наступает раньше не менее чем на 10 дней.

Таблица 2. Общая характеристика гликолипидов, содержащихся в почках березы повислой в зимне-весенний период в условиях Карелии и Якутии

Table 1. General characterisation of glycolipids contained in birch buds in winter-spring period in conditions of Karelia and Yakutia

Месяц Month	Карелия Karelia				Якутия Yakutia			
	S	U	U/S	DBI	S	U	U/S	DBI
Январь January	19,34	80,66	4,17	2,06	36,20	63,79	1,76	2,08
Март March	19,26	80,74	4,19	2,07	21,57	78,43	3,64	2,13
Апрель April	18,46	81,54	4,42	2,48	29,71	70,29	2,37	2,15
Май May	16,70	83,30	4,99	2,77	25,31	74,69	2,95	2,74

Примечание. S – насыщенные ЖК (в % от суммы ЖК), U – ненасыщенные ЖК (в % от суммы ЖК), U/S – коэффициент ненасыщенности, DBI – индекс двойной связи.

Note. S – saturated FAs (% of total FAs), U – unsaturated FA (% of total FAs), U/S – unsaturation coefficient, DBI – double bond index.

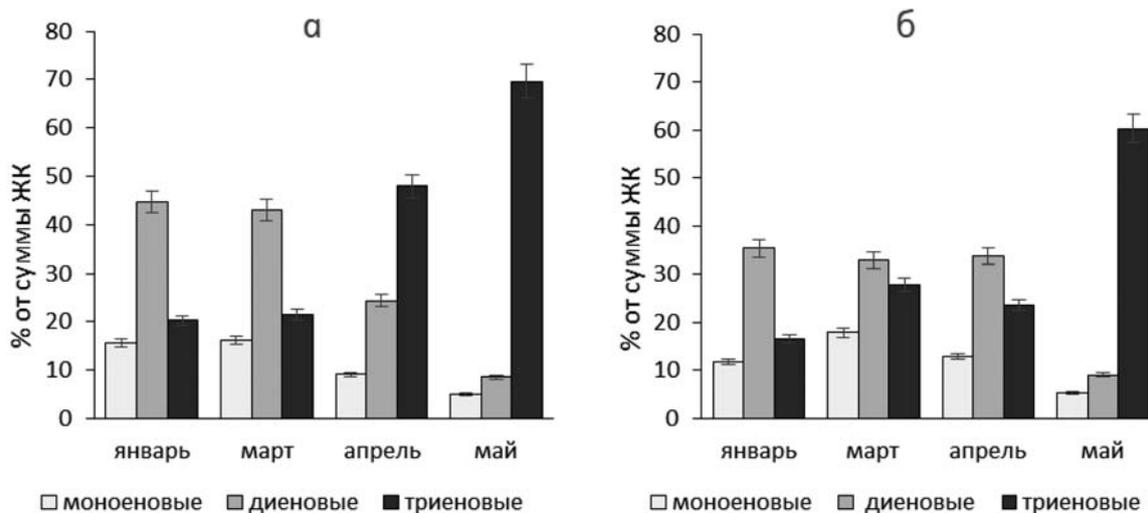


Рис. 1. Относительное содержание моно-, ди- и триеновых ЖК в гликолипидах почек березы повислой в зимне-весенний период в условиях Карелии (а) и Якутии (б)

Fig. 1. The relative content of mono-, di- and trienoic fatty acids (FAs) in the glycolipids of silver birch buds during the winter-spring period in Karelia (a) and in Yakutia (b), % of total FAs

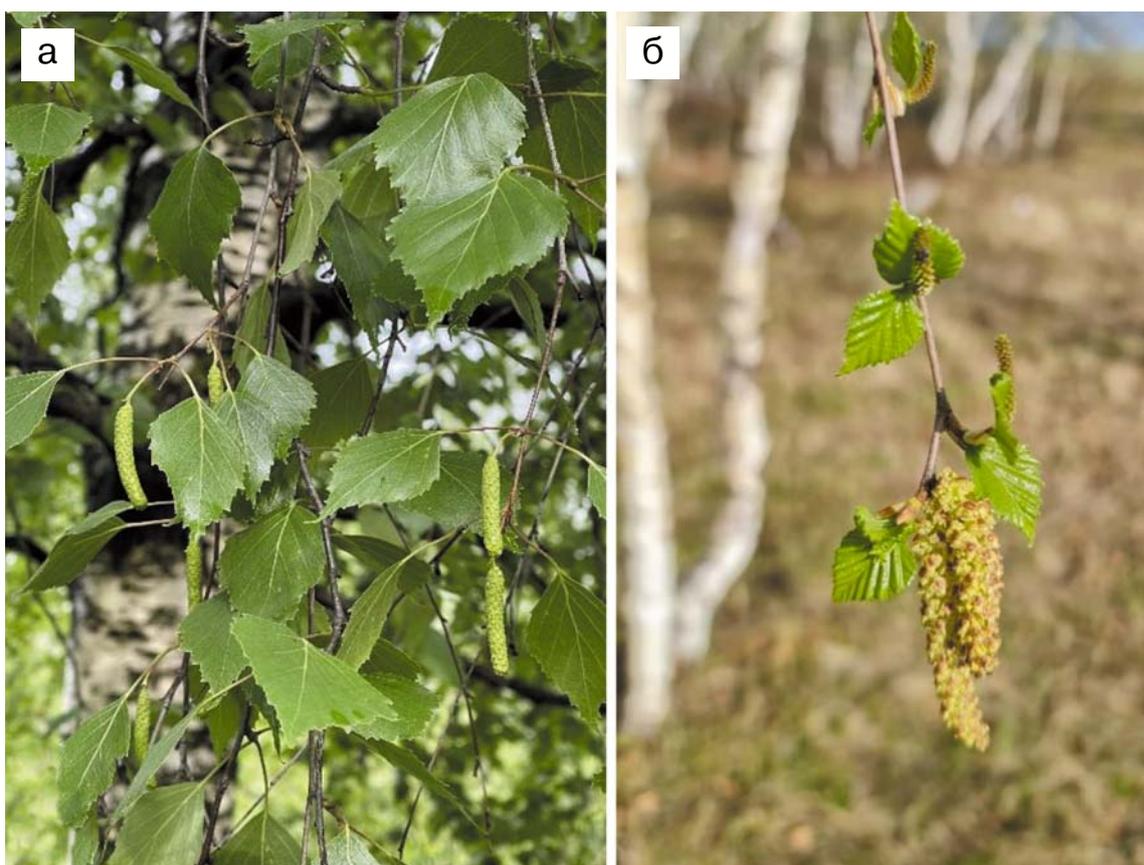


Рис. 2. Деревья березы повислой, произрастающие на одной широте в контрастных по природно-климатическим условиям регионах России, на разных фазах развития: (а) – в Карелии (62° с. ш. 34° в. д.) и (б) – в Якутии (62° с. ш. 130° в. д.) в один и тот же день 28.05.2024 г.

Fig. 2. Silver birch trees, growing at the same latitude in contrasting natural and climatic conditions in the regions of Russia at different developmental phases: (a) – in Karelia (62°N, 34°E) and (b) – in Yakutia (62°N, 130°E) on the same day (2024.05.28)

К примеру, 28 мая 2024 г. в окрестностях г. Петрозаводска (62° с. ш. 34° в. д.) у березы повислой наблюдали активный рост листовой пластинки и даже формирование плодовой сережки (рис. 2, а). В окрестностях г. Якутска (62° с. ш. 130° в. д.) в тот же день наблюдалось лишь начало роста листовой пластинки и одновременное с ним цветение пестичных (женских) соцветий (после их выхода из почек) и тычиночных (мужских) (рис. 2, б). Интересно, что в мае, несмотря на контрастность условий произрастания и различия в фенофазах развития деревьев, в обоих регионах в ГЛ почек березы повислой доминировали триеновые ЖК (69,6 и 60,3 % в Карелии и Якутии соответственно) (рис. 1).

В ГЛ почек березы повислой в зимне-весенний период развития основной среды моеновых была олеиновая ЖК ($C_{18:1}$), среди диеновых – линолевая ($C_{18:2}$), а среди триеновых – линоленовая ($C_{18:3}$). В условиях Карелии в период вынужденного покоя (январь–март) в составе ненасыщенных ЖК преобладала линолевая (около 37 %). Повышение температуры воздуха (апрель–май) повлекло за собой увеличение линоленовой ЖК, доля которой к маю достигла 67 % (рис. 3). В Якутии также наблюдали высокий уровень линолевой ЖК (около 35 %), но по продолжительности он сохранялся дольше – с января по апрель. К началу вегетации (в мае) независимо от континентальности климата в ГЛ почек березы повислой доминировала линоленовая ЖК (67,0 и 59,4 % в Карелии и Якутии соответственно). В этом проявилась сходная реакция ГЛ, содержащихся в почках деревьев

березы повислой, на действие факторов внешней среды в весенний период независимо от природно-климатических условий места их произрастания.

Накопление линоленовой ЖК в гликолипидах, которые сосредоточены преимущественно в тилакоидных мембранах хлоропластов, по всей вероятности, связано с подготовкой фотосинтетического аппарата зачаточных структур вегетативных и генеративных органов, сформировавшихся в почках, к началу раскрытия последних. Основная функция хлоропластов заключается в преобразовании энергии света в химическую энергию, от которой в значительной степени зависит жизнедеятельность растений. Однако, как известно, их мембраны проявляют высокую чувствительность к колебаниям факторов внешней среды [Cook et al., 2021]. Имеются сведения, что ненасыщенные ЖК способствуют восстановлению комплекса фотосистемы II в случае ее повреждения светом [Allakhverdiev et al., 2009]. Ранее показано также, что высокий уровень накопления линоленовой ЖК в суммарных липидах хвои ели сибирской *Picea obovata* в условиях Восточной Сибири совпадает с весенним максимумом содержания хлорофиллов в ССК (светособирающем комплексе) [Иванова и др., 2018]. Имеются и другие доказательства, подтверждающие важную роль ГЛ в сохранении стабильного функционирования мембран хлоропластов в условиях действия на растения неблагоприятных факторов внешней среды, в первую очередь таких, как свет и температура [Hernández, Cejudo, 2021].

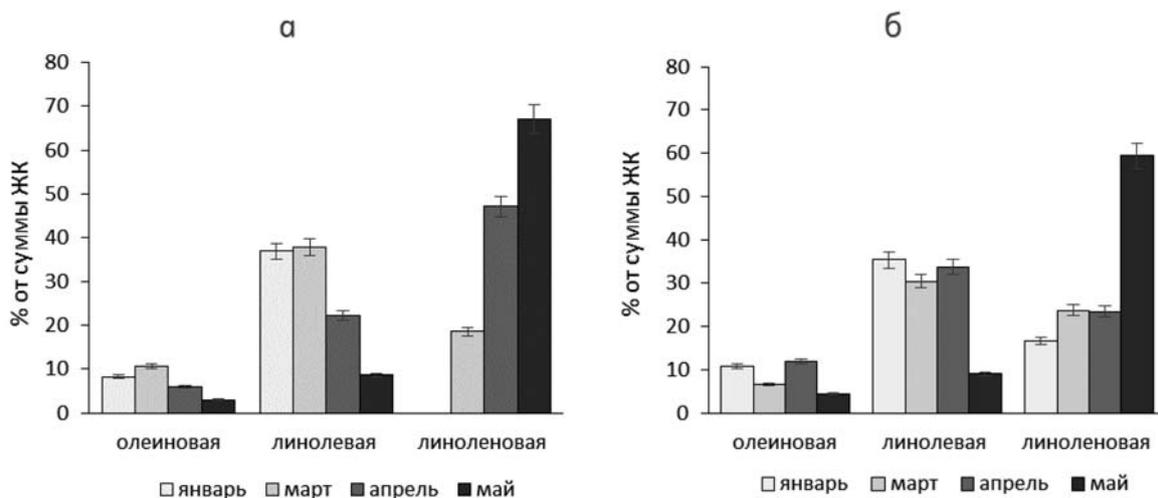


Рис. 3. Относительное содержание олеиновой, линолевой и линоленовой ЖК в гликолипидах почек березы повислой в зимне-весенний период в условиях Карелии (а) и Якутии (б)

Fig. 3. The relative content of oleic, linoleic and linolenic FAs in the glycolipids of silver birch buds during the winter-spring period in Karelia (a) and in Yakutia (b), % of total FAs

Среди насыщенных ЖК основными в ГЛ были пальмитиновая (C_{16:0}) и стеариновая (C_{18:0}). Доля пальмитиновой ЖК в почках березы повислой устойчиво снижалась в зимне-весенний период, но ее значения в Якутии были выше по сравнению с Карелией (например, в январе – 26,1 и 16,9 %, в мае – 20,9 и 15,6 % соответственно). Стеариновая ЖК в условиях Карелии стабильно присутствовала в период вынужденного покоя деревьев березы повислой (2,4 %), но к началу вегетации (в мае) уменьшилась в 4 раза (до 0,6 %). В Якутии ее максимальное содержание зафиксировано в январе (9,5 %), когда температура воздуха была –45 °С и даже ниже. К началу вегетации доля стеариновой ЖК снизилась (до 3,7 %), но по абсолютным значениям была выше, чем в Карелии.

Рассматривая текучесть мембран в качестве основного параметра, обеспечивающего их нормальное функционирование в период низких зимних температур, необходимо оценивать активность ω9-, ω6- и ω3-ацил-липидных десатураз [Cook et al., 2021], которые повышают уровень ненасыщенности липидов в результате превращения одинарной связи, характерной для насыщенных ЖК, в двойную между определенными атомами углерода. На данный момент принято проводить ее косвенную оценку по величине индексов, отражающих стеариол- (SDR), олеил- (ODR) и линолеил- (LDR) десатуразные отношения.

В ГЛ почек березы повислой устойчиво высокий уровень активности ω9-ацил-липидной десатуразы, обеспечивающей введение первой двойной связи в углеводородную цепь, наблюдали по индексу SDR, причем его значения в Карелии были выше по сравнению с Якутией

в 1,5 раза, кроме апреля, когда они сравнялись и составили около 0,7. Это свидетельствует о значительной активности ω9-ацил-липидной десатуразы, направленной на превращение стеариновой ЖК в олеиновую и образование тем самым субстрата для дальнейшего синтеза ди- и триеновых ЖК.

Максимальная активность зафиксирована у ω6-десатуразы, ответственной за превращение олеиновой кислоты в линолевою. На это указывают высокие значения индекса ODR в ГЛ почек березы повислой (0,87–0,96 и 0,83–0,94 в условиях Карелии и Якутии соответственно), которые имели тенденцию увеличения с января по май (табл. 3) за исключением небольшого понижения в марте в Карелии (на 0,03) или в апреле в Якутии (на 0,06). Снижение ODR сопровождалось накоплением олеиновой ЖК, при этом в период вынужденного покоя ее доля варьировала от 6 до 12 %, но к началу вегетации снизилась вдвое (рис. 3).

Интересными оказались данные по индексу LDR, значения которого в наиболее холодный зимний период были наименьшими (0,32), а к началу вегетации увеличились почти втрое (0,88) независимо от места произрастания деревьев. Это говорит о том, что олеиновая кислота по мере ее образования не накапливалась, а превращалась в линолевою (с января по апрель), а затем – в линоленую (в мае) (благодаря увеличению активности ω3-ацил-липидной десатуразы), придавая биологическим мембранам большую текучесть, необходимую не только для выживания, но и для внутрипочечного развития зачаточных структур вегетативных и генеративных органов березы повислой в зимне-весенний период (рис. 3).

Таблица 3. Значения индексов, отражающих изменение активности ω9-, ω6- и ω3- десатураз в гликолипидах почек березы повислой в зимне-весенний период в условиях Карелии и Якутии

Table 3. Values of indices reflecting changes in the activity of ω9-, ω6- and ω3- desaturases in bud glycolipids of silver birch in winter-spring period in conditions of Karelia and Yakutia

Месяц Month	Карелия Karelia			Якутия Yakutia		
	SDR (ω9)	ODR (ω6)	LDR (ω3)	SDR (ω9)	ODR (ω6)	LDR (ω3)
Январь January	0,77	0,87	0,32	0,53	0,83	0,32
Март March	0,79	0,84	0,33	0,58	0,89	0,44
Апрель April	0,70	0,92	0,68	0,67	0,83	0,41
Май May	0,81	0,96	0,89	0,55	0,94	0,87

Примечание. SDR, ODR, LDR – стеариол-, олеил- и линолеил-десатуразные отношения.

Note. SDR, ODR, LDR – stearoyl-, oleoyl- and linoleoyl-desaturase ratios.

Однако накопление линоленовой ЖК в ГЛ по срокам происходило позднее в условиях Якутии (в мае), чем в Карелии (в апреле), что, по-видимому, обусловлено влиянием природно-климатических факторов, характерных для местообитания деревьев.

В целом полученные результаты хорошо согласуются с общепринятой точкой зрения о том, что накопление ненасыщенных ЖК в составе ГЛ является одним из важных механизмов, обеспечивающих высокую устойчивость растений к действию природно-климатических факторов, и в первую очередь низких отрицательных температур. Так, в зимне-весенний период содержание ненасыщенных ЖК в ГЛ почек березы повислой в условиях Карелии превышает 80 % (от суммы ЖК), а в Якутии – варьирует от 64 до 78 %. Одновременно с этим происходит увеличение значений не только коэффициента ненасыщенности и индекса двойной связи, но и активности ацил-липидных десатураз. В частности, в период вынужденного покоя в ГЛ почек березы повислой наблюдается высокая активность ω 6-десатуразы, ответственной за синтез линолевой ЖК. Резкое повышение активности ω 3-десатуразы (в 2,7 раза) в ГЛ способствовало синтезу линоленовой ЖК, доля которой в почках березы повислой к началу вегетации увеличилась в условиях Карелии в 1,4 раза, а в Якутии – в 2,5. По всей вероятности, это обусловлено тем, что зачаточные органы вегетативных и генеративных побегов, сформированные в почках, содержат хлоропласты, тилакоидные мембраны которых состоят преимущественно из ГЛ, содержащих, как правило, 60–70 % триеновых ЖК [Hernández, Sejudo, 2021], основной из которых является линоленовая. Результаты исследований дают также основания предположить, что на ЖК-состав гликолипидов почек березы повислой оказывает влияние не только температура воздуха и почвы (особенно в условиях многолетней мерзлоты), но и световой фактор, действие которого они испытывают с началом вегетации при распускании почек. Помимо этого, исследование показало, что сроки начала вегетации березы повислой в условиях Якутии, где климат резко континентальный, в весенний период сдвигаются на более поздние по сравнению с Карелией, где климат умеренно-континентальный, переходный к морскому. Однако только на основании представленных в статье данных трудно однозначно судить о причинах, определяющих сдвиги в сроках прохождения фенофаз березы повислой, произрастающей в разных природно-климатических условиях.

С одной стороны, они могут отражать адаптационный потенциал березы повислой, который по-разному реализуется в условиях Карелии и Якутии, а с другой – в условиях Якутии в процессе эволюции могла обособиться ее восточноазиатская географическая разновидность (раса), которая некоторыми авторами рассматривается в качестве самостоятельного вида – березы плосколистной *Betula platyphylla* Sukacz [Schenk et al., 2008; Выводцев, Тютрин, 2012; Скворцов и др., 2022].

Выводы

1. В гликолипидах почек березы повислой, произрастающей в двух разных регионах (Карелия и Якутия), находящихся на одной широте, но на значительном удалении друг от друга, ненасыщенные ЖК преобладают над насыщенными, доля которых увеличивается с января по май (при этом их количество в почках деревьев в условиях Карелии выше, чем в Якутии, за исключением марта, когда их значения были близки). Эти изменения сопровождались повышением коэффициента ненасыщенности и индекса двойной связи.

2. В Карелии в условиях умеренно континентального климата в период вынужденного покоя (январь–март) в гликолипидах почек березы повислой преобладали диеновые ЖК, а с повышением температуры воздуха (апрель–май) – триеновые ЖК. В Якутии повышение доли триеновых ЖК наблюдали только в мае, что, по-видимому, обусловлено низкой температурой не только воздуха, но и корнеобитаемого слоя почвы в условиях многолетней мерзлоты.

3. В гликолипидах почек березы повислой независимо от места произрастания выявлена высокая активность ω 6- и ω 3-десатураз, о чем свидетельствует увеличение индексов олеил- (ODR) и линолеил- (LDR) десатуразных отношений. При этом значения ω 9-десатуразы (SDR), катализирующей синтез олеиновой ($C_{18:1}$) ЖК, были выше в условиях Карелии по сравнению с Якутией почти в 1,5 раза, за исключением апреля, когда они оказались приблизительно равными.

4. Усиление почти втрое наблюдаемой в мае активности ω 3-десатуразы (рассчитанной на основании LDR) в гликолипидах почек березы повислой позволяет предположить, что увеличение доли линоленовой ($C_{18:3}$) ЖК к началу вегетации повышает устойчивость тканей зачаточных вегетативных и генеративных органов не только к перепадам температуры воздуха в весенний период, но и к изменению световых условий при распускании почек.

5. На примере березы повислой, произрастающей в Карелии и Якутии, показано, что в гликолипидах почек, несущих зачаточные структуры побегов, происходят во многом сходные изменения, выражающиеся: а) в повышении коэффициента ненасыщенности и индекса двойной связи с января по май; б) в преобладании диеновых ЖК (за счет линолевой) в период вынужденного покоя, а триеновых (за счет линоленовой) – в мае; в) в устойчиво высоком подъеме активности ω 9- (SDR) и ω 6- (ODR) десатураз в зимне-весенний период и быстром росте ω 3- (LDR) десатуразы – к началу вегетации. По-видимому, активность десатураз в зимний период обусловлена прежде всего общим физиологическим состоянием деревьев, а в весенний – фазой внутрипочечного развития зачаточных органов. Указанные изменения в гликолипидах, наряду со многими другими физиолого-биохимическими изменениями, которые происходят в растениях в зимне-весенний период, выступают в качестве причины более поздних сроков начала вегетации березы повислой, произрастающей в более экстремальных условиях, характерных для Якутии.

Авторы выражают глубокую благодарность А. А. Перку, А. Г. Пономареву, И. В. Васильевой, О. С. Серебряковой и Н. Е. Петровой за помощь в сборе растительного материала в Якутии и Карелии, а также М. К. Ильиной и И. В. Морозовой за частичную обработку первичных данных.

Литература

Алаудинова Е. В., Миронов П. В. Липиды меристем лесообразующих хвойных пород Центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 2. Особенности метаболизма жирных кислот фосфолипидов меристем *Larix sibirica* Ledeb., *Picea obovata* L. и *Pinus sylvestris* L. // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 71–76.

Алаудинова Е. В., Поваляева В. А., Миронов П. В. Липиды меристем лесообразующих хвойных пород Центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 3. Особенности обмена нейтральных липидов меристем почек *Larix sibirica* Ledeb., *Picea obovata* L. и *Pinus sylvestris* L. // Химия растительного сырья. 2010. № 1. С. 67–74.

Ананичева М. Д., Литвиненко Т. В., Филиппова В. В. Изменение климата в Республике Саха (Якутия) и его влияние на население: инструментальные измерения и наблюдения местных жителей // Географическая среда и живые системы. 2021. № 3. С. 6–21. doi: 10.18384/2712-7621-2021-3-6-21

Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Пространственная и возрастная структура популяций березы повислой и карельской березы // Труды Карельского

научного центра РАН. 2021. № 11. С. 22–38. doi: 10.17076/eb1501

Выводцев Н. В., Тютрин С. А. Изучение роста березы плосколистной (*Betula platyphylla* Suk.) // Ученые заметки ТОГУ. 2012. Вып. 3, № 1. С. 18–28.

Иванова М. В., Макаренко С. П., Суворова Г. Г. Жирнокислотный состав суммарных липидов хвои *Picea obovata* в весенний период вегетации // Сибирский экологический журнал. 2018. № 2. С. 239–247. doi: 10.15372/SEJ20180208

Климатические данные регионов. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [Электронный ресурс]. URL: <http://www/meteo.ru/data> (дата обращения: 04.11.2024).

Лось Д. А. Десатуразы жирных кислот. М.: Научный мир, 2014. 372 с.

Нохоров В. В., Дударева Л. В., Петров К. А. Состав и содержание липидов и их жирных кислот в хвое *Pinus sylvestris* L. и *Picea obovata* Ledeb. при закаливании к низкой температуре в условиях криолитозоны Якутии // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 4. С. 286–294. doi: 10.1134/S0015330319040109

Попов В. Н., Нарайкина Н. В., Пчелкин В. П. Роль ω 3-ацил-липидных десатураз жирных кислот в низкотемпературном закаливании *Solanum tuberosum* L. // Физиология растений. 2020. Т. 67, № 5. С. 547–553. doi: 10.31857/S0015330320040120

Розенцвет О. А., Нестеров В. Н., Богданова Е. С., Гребенкина Т. М., Головки Т. К. Влияние кратковременных и продолжительных колебаний факторов среды на состав липидов *Plantago media* (L.) в условиях Южного Тимана // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, № 1/3. С. 791–799.

Сиймер Э. Х., Таутс О. В., Мейстер К. Э. Рассчитанные значения ЭДЦ cis-полиеновых метилен-разделенных жирных кислот // Труды Таллинского политех. ин-та. Серия А. 1971. № 300. С. 73–78.

Скворцов К. И., Нешатаева В. Ю., Нешатаев В. Ю., Якубов В. В., Кузьмина Е. Ю., Кириченко В. Е. Новые данные о распространении березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) в Олуторском районе Корьякского округа (Камчатский край) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 1. С. 89–97. doi: 10.17076/bg1531

Титов А. Ф., Таланова В. В. Локальное действие высоких и низких температур на растения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 166 с.

Трунова Т. И. Растение и низкотемпературный стресс. М.: Наука, 2007. 54 с. (Тимирязевские чтения, 64)

Allakhverdiev S. I., Los D. A., Murata N. Regulatory roles in photosynthesis of unsaturated fatty acids in membrane lipids // Lipids in Photosynthesis: Essential and Regulatory Functions / Wada H., Murata N., eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. P. 373–388.

Cook R., Lupette J., Benning C. The role of chloroplast membrane lipid metabolism in plant environmental responses // Cells. 2021. Vol. 10, no 3. Art. 706. doi: 10.3390/cells10030706

Delgado M., Roslin T., Tikhonov G. et al. Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events // PNAS.

2020. Vol. 117(49). P. 31249–31258. doi: 10.1073/pnas.2002713117

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data // *Inland Waters*. 2019. Vol. 9, no 2. P. 130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Grimberg Å., Lager I., Street N. R., Robinson K. M., Marttila S., Mähler N., Ingvarsson P. K., Bhalerao R. P. Storage lipid accumulation is controlled by photoperiodic signal acting via regulators of growth cessation and dormancy in hybrid aspen // *New Phytol.* 2018. Vol. 219, no. 2. P. 619–630. doi: 10.1111/nph.15197

He M., Ding N.-Z. Plant unsaturated fatty acids: Multiple roles in stress response // *Front. Plant Sci., Sec. Plant Physiol.* 2020. Vol. 11. Art. 562785. doi: 10.3389/fpls.2020.562785

Hernández M. L., Cejudo F.J. Chloroplast lipids metabolism and function. A redox perspective // *Front. Plant Sci.* 2021. Vol. 12. Art. 712022. doi: 10.3389/fpls.2021.712022

Jaworski J. G., Stumpf P. K. Fat metabolism in higher plants. Properties of a soluble stearyl-acyl carrier protein desaturase from maturing *Carthamus tinctorius* // *Arch. Biochem. Biophys.* 1974. Vol. 162. P. 158–165.

Los D. A., Mironov K. S., Allakhverdiev S. I. Regulatory role of membrane fluidity in gene expression and physiological functions // *Photosynth. Res.* 2013. Vol. 116, no. 2–3. P. 489–509. doi: 10.1007/s1120-013-9823-4

Lyons J. M., Wheaton T. A., Pratt H. K. Relationship between the physical nature of mitochondrial membranes and chilling sensitivity in plant // *Plant Physiol.* 1964. Vol. 39. P. 262–268.

Nakamura Yu., Shimizu K., Ando Ya. Gas chromatographic equivalent chain length (ECL) values of fatty acid methyl esters on a highly polar ionic liquid column, SLBIL111 // *Bull. Fish. Sci. Hokkaido Univ.* 2014. Vol. 64, no. 1. P. 9–16.

Piispanen R., Saranpää P. Seasonal and within-stem variations of neutral lipids in silver birch (*Betula pendula*) wood // *Tree Physiology*. 2004. Vol. 24, no. 9. P. 991–999. doi: 10.1093/treephys/24.9.991

Roslin T., Antão L., Hällfors M. et al. Phenological shifts of abiotic events, producers and consumers across a continent // *Nat. Climate Change*. 2021. Vol. 11, no. 3. P. 241–248. doi: 10.1038/s41558-020-00967-7

Schenk M. F., Thienpont C.-H., Koopman W. J. M., Gilissen L. J. W. J., Smulders M. J. M. S. Phylogenetic relationships in *Betula* (*Betulaceae*) based on AFLP markers // *Tree Genet. Genomes*. 2008. Vol. 4. P. 911–924. doi: 10.1007/s11295-008-0162-0

Simola L. K., Koskimies-Soininen K. Comparison of glycolipids and plastids in callus cells and leaves of *Alnus* and *Betula* // *Plant Cell Physiol.* 1984. Vol. 25. P. 1329–1340.

Strimbeck G. R., Schaberg P. G., Fossdal C. G., Schröder W. P., Kjellsen T. D. Extreme low temperature tolerance in woody plants // *Front Plant Sci.* 2015. Vol. 6. Art. 884. doi: 10.3389/fpls.2015.00884

Theocharis A., Clément Ch., Barka E. A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperature // *Planta*. 2012. Vol. 235. P. 1091. doi: 10.1007/s00425-012-164/-y

Xiao R., Zou Y., Guo X., Li H., Lu H. Fatty acid desaturases (FADs) modulate multiple lipid metabolism pathways to improve plant resistance // *Mol. Biol. Rep.* 2022. Vol. 49. P. 9997–10011. doi: 10.1007/s11033-022-07568-x

References

Alaudinova E. V., Mironov P. V. Lipids of the meristems of the main coniferous edificators from Central Siberia under low-temperature adaptation: 2. Features of the fatty acid metabolism of phospholipids from winter meristems of *Larix sibirica* Ledeb., *Picea obovata* L., and *Pinus sylvestris* L. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*. 2009;2:71–76. (In Russ.)

Alaudinova E. V., Povalyaeva V. A., Mironov P. V. Lipids of meristems of forest-forming conifers of Central Siberia under conditions of low-temperature adaptation. 3. Features of neutral lipid metabolism of *Larix sibirica* Ledeb., *Picea obovata* L. and *Pinus sylvestris* L. bud meristems. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*. 2010;1:67–74. (In Russ.)

Allakhverdiev S. I., Los D. A., Murata N. Regulatory roles in photosynthesis of unsaturated fatty acids in membrane lipids. Wada H. and Murata N. eds. *Lipids in photosynthesis: Essential and regulatory functions*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2009. P. 373–388.

Ananicheva M. D., Litvinenko T. V., Filippova V. V. Climate change in the Republic of Sakha (Yakutia) and its impact on the population: instrumental measurement and observations of the local population. *Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy = Geographical Environment and Living Systems*. 2021;(3):6–21. (In Russ.). doi: 10.18384/2712-7621-2021-3-6-21

Climatic data of the regions. FGBU VNIIGMI-MTSD (All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information, World Data Centre). (In Russ.). URL: <http://www/meteo.ru/data> (accessed: 04.11.2024).

Cook R., Lupette J., Benning C. The role of chloroplast membrane lipid metabolism in plant environmental responses. *Cells*. 2021;10(3):706. doi: 10.3390/cells10030706

Delgado M., Roslin T., Tikhonov G. et al. Differences in spatial versus temporal reaction norms for spring and autumn phenological events. *PNAS*. 2020;117(49):31249–31258. doi: 10.1073/pnas.2002713117

Filatov N., Baklagin V., Efremova T., Nazarova L., Palshin N. Climate change impacts on the watersheds of lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters*. 2019;9(2):130–141. doi: 10.1080/20442041.2018.1533355

Grimberg Å., Lager I., Street N. R., Robinson K. M., Marttila S., Mähler N., Ingvarsson P. K., Bhalerao R. P. Storage lipid accumulation is controlled by photoperiodic signal acting via regulators of growth cessation and dormancy in hybrid aspen. *New Phytol.* 2018;219(2):619–630. doi: 10.1111/nph.15197

He M., Ding N.-Z. Plant unsaturated fatty acids: Multiple roles in stress response. *Front. Plant Sci., Sec. Plant Physiol.* 2020;11:562785. doi: 10.3389/fpls.2020.562785

Hernández M. L., Cejudo F. J. Chloroplast lipids metabolism and function. A redox perspective. *Front. Plant Sci.* 2021;12:712022. doi: 10.3389/fpls.2021.712022

Ivanova M. V., Makarenko S. P., Suvorova G. G. Fatty acid composition of total lipids of *Picea obovata* needles in the spring growing season. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Siberian Ecological Journal.* 2018;2:239–247. (In Russ.). doi: 10.15372/SEJ20180208

Jaworski J. G., Stumpf P. K. Fat metabolism in higher plants. Properties of a soluble stearyl-acyl carrier protein desaturase from maturing *Carthamus tinctorius*. *Arch. Biochem. Biophys.* 1974;162:158–165.

Los D. A. Fatty acid desaturases. Moscow: Nauchnyi mir; 2014. 372 p. (In Russ.)

Los D. A., Mironov K. S., Allakhverdiev S. I. Regulatory role of membrane fluidity in gene expression and physiological functions. *Photosynth. Res.* 2013;116;(2–3):489–509. doi: 10.1007/s11120-013-9823-4

Lyons J. M., Wheaton T. A., Pratt H. K. Relationship between the physical nature of mitochondrial membranes and chilling sensitivity in plant. *Plant Physiol.* 1964;39:262–268.

Nakamura Yu., Shimizu K., Ando Ya. Gas chromatographic equivalent chain length (ECL) values of fatty acid methyl esters on a highly polar ionic liquid column, SLBIL111. *Bull. Fish. Sci. Hokkaido Univ.* 2014;64(1):9–16.

Nokhsorov V. V., Dudareva L. V., Petrov K. A. Composition and content of lipids and their fatty acids in the pine needles of *Pinus sylvestris* L. and *Picea obovata* Ledeb. during hardening to low temperature under cryolithozone conditions in Yakutia. *Fiziologiya rastenii = Russian Journal of Plant Physiology.* 2019;66(4):286–294. (In Russ.). doi: 10.1134/s1021443719040101

Piispanen R., Saranpää P. Seasonal and within-stem variations of neutral lipids in silver birch (*Betula pendula*) wood. *Tree Physiology.* 2004;24(9):991–999. doi: 10.1093/treephys/24.9.991

Popov V. N., Naraikina N. V., Pchelkin V. P. Role of fatty acid ω 3 acyl-lipid desaturases in low-temperature hardening of *Solanum tuberosum* L. *Fiziologiya rastenii = Russian Journal of Plant Physiology.* 2020;67(5):547–553. (In Russ.). doi: 10.31857/S0015330320040120

Roslin T., Antão L., Hällfors M. et al. Phenological shifts of abiotic events, producers and consumers across a continent. *Nature Climate Change.* 2021;11(3):241–248. doi: 10.1038/s41558-020-00967-7

Rozentsvet O. A., Nesterov V. N., Bogdanova E. S., Grebenkina T. M., Golovko T. K. Influence of short-term and long fluctuations of factors of environment on the content of lipids *Plantago media* L. in the conditions

of Southern Timan. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the RAS.* 2012;14(1/3):791–799. (In Russ.)

Schenk M. F., Thienpont C.-H., Koopman W. J. M., Gilissen L. J. W. J., Smulders M. J. M. S. Phylogenetic relationships in *Betula* (Betulaceae) based on AFLP markers. *Tree Genet. Genomes.* 2008;4:911–924. doi: 10.1007/s11295-008-0162-0

Seimer E. Kh., Tauts O. V., Meister K. E. Calculated EDC values of cis-polyene methyleneseparated fatty acids. *Trudy Tallinskogo politekh. in-ta. Seriya A = Trudy Tallinn Polytechnic. Inst. Ser. A.* 1971;(300):73–78. (In Russ.)

Simola L. K., Koskimies-Soininen K. Comparison of glycolipids and plastids in callus cells and leaves of *Alnus* and *Betula*. *Plant Cell Physiol.* 1984;25:1329–1340.

Skvortsov K. I., Neshataeva V. Yu., Neshataev V. Yu., Yakubov V. V., Kuzmina E. Yu., Kirichenko V. E. New data on the distribution of Japanese white birch (*Betula platyphylla* Sukacz.) in the Olyutorsky District of the Koryak Okrug (Kamchatsky Krai). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2022;1:89–97. (In Russ.). doi: 10.17076/bg1531

Strimbeck G. R., Schaberg P. G., Fossdal C. G., Schröder W. P., Kjellsen T. D. Extreme low temperature tolerance in woody plants. *Frontiers in Plant Science.* 2015;6:884. doi: 10.3389/fpls.2015.00884

Theocharis A., Clément Ch., Barka E. A. Physiological and molecular changes in plants grown at low temperature. *Planta.* 2012;235:1091. doi: 10.1007/s00425-012-164-y

Titov A. F., Talanova V. V. Local effect of high and low temperatures on plants. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 312 p. (In Russ.)

Trunova T. I. Plant and low-temperature stress. Moscow: Nauka; 2007. 54 p. (Timiryazev Readings, 64). (In Russ.)

Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Spatial and age structure of silver birch and curly birch populations. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2021;11:22–38. (In Russ.). doi: 10.17076/eb1501

Vyvodtsev N. V., Tyutrin S. A. Management-volume inventory of Asian white birch (*Betula platyphylla* Suk.). *Uchenye zametki TOGU = Electronic scientific journal "Scientists notes PNU".* 2012;3(1):18–28. (In Russ.)

Xiao R., Zou Y., Guo X., Li H., Lu H. Fatty acid desaturases (FADs) modulate multiple lipid metabolism pathways to improve plant resistance. *Mol. Biol. Rep.* 2022;49:9997–10011. doi: 10.1007/s11033-022-07568-x

Поступила в редакцию / received: 06.11.2024; принята к публикации / accepted: 12.12.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ветчинникова Лидия Васильевна

д-р биол. наук, главный научный сотрудник лаборатории лесных биотехнологий

e-mail: vetchin@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Vetchinnikova, Lidia

Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher

Титов Александр Федорович

чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, профессор,
руководитель лаборатории экологической
физиологии растений

e-mail: titov@krc.karelia.ru

Татаринова Татьяна Дмитриевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник
отдела экспериментальной биологии растений
мерзлотных экосистем

e-mail: t.tatarinova@gmail.com

Titov, Alexander

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Biol.), Professor,
Head of Laboratory

Tatarinova, Tatiana

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 504.054

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕР Г. МОНЧЕГОРСКА

С. А. Игловский*, А. В. Баженов, Е. Ю. Яковлев

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

Представлены результаты радиоэкологических исследований в районе г. Мончегорска (Мурманская область). Цель работы – выявление основных закономерностей пространственного распределения естественных и техногенных радионуклидов в городских почвах и донных отложениях озер исследуемой территории. Проведен отбор проб во всех зонах города из верхнего (0–5 см) слоя почвы, а также в подфакельной зоне за пределами городской черты (всего 68 проб). Отбор донных проб производился из поверхностного (0–5 см) слоя озер Лумболка, Ньюдъявр, Комсомольское, Имандра и реки Ньюдауй (19 проб). В ходе экспедиционных работ и лабораторных исследований использовались почвенный, радиологический, математико-статистический методы. Значения удельной активности радионуклидов в пробах городских почв составили: техногенного ^{137}Cs – до 31,3 Бк/кг, в подфакельных почвах – до 63,4 Бк/кг; естественных радионуклидов: ^{226}Ra – до 14,2 Бк/кг, в подфакельных почвах – до 21,6 Бк/кг, ^{232}Th – до 18,3 Бк/кг, в подфакельных почвах – до 17 Бк/кг, ^{40}K – до 498 Бк/кг, в подфакельных почвах – до 317 Бк/кг. В донных отложениях озер: техногенного ^{137}Cs – до 45,8 Бк/кг, естественных радионуклидов: ^{226}Ra – до 62,6 Бк/кг, ^{232}Th – 11 Бк/кг, ^{40}K – 268 Бк/кг. На пространственное распределение естественных радионуклидов в городских почвах и донных отложениях озер г. Мончегорска несомненное влияние оказывает близкое залегание коренных пород: гнейсов, кристаллических сланцев, гранодиоритов, диоритов, диорито-гнейсов. На распространение ^{137}Cs могли оказать влияние стратосферные выпадения в результате атмосферных ядерных испытаний, локальные выпадения в результате испытаний на ядерном полигоне архипелага Новая Земля, подземных ядерных взрывов «Днепр-1» и «Днепр-2».

Ключевые слова: удельная активность; городские почвы; донные отложения озер; ^{137}Cs ; ^{40}K ; ^{226}Ra ; ^{232}Th ; Мончегорск; Мурманская область; радиационная безопасность населения

Для цитирования: Игловский С. А., Баженов А. В., Яковлев Е. Ю. Закономерности пространственного распределения естественных и техногенных радионуклидов в городских почвах и донных отложениях озер г. Мончегорска // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 27–41. doi: 10.17076/eco1900

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ гос. регистрации 122011300333-1). Работа по исследованию физико-химических показателей поддержана грантом РФФ № 20-77-10057.

S. A. Iglovsky*, A. V. Bazhenov, E. Yu. Yakovlev. PATTERNS IN THE SPATIAL DISTRIBUTION OF NATURAL AND MAN-MADE RADIONUCLIDES IN URBAN SOILS AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES OF MONCHEGORSK

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (109 Nab. Severnoy Dviny, 163000 Arkhangelsk, Russia), *iglovskys@mail.ru*

The article presents the results of radioecological studies in Monchegorsk city area (Murmansk Region). The aim was to identify the main patterns in the spatial distribution of natural and man-made radionuclides in urban soils and bottom sediments of lakes in the study area. Samples were collected across the city from the top 0–5 cm of soil as well as in the flare plume outside the city limits (68 samples). Sediment samples were taken from the top (0–5 cm) layer in lakes Lumbolka, Nyudyavr, Komsomolskoye, Imandra and Nyudyay (19 samples). Pedological, radiological, and mathematical statistics methods were used in the field and laboratory work. The values of the man-made ^{137}Cs specific activity were up to 31.3 Bq/kg in urban soil samples and up to 63.4 Bq/kg in soils within the industry impact zone. The values for natural radionuclides in soils were up to 14.2 Bq/kg in urban soils and up to 21.6 Bq/kg in the flare plume for ^{226}Ra , up to 18.3 Bq/kg in urban soils and up to 17 Bq/kg in the flare plume for ^{232}Th , up to 498 Bq/kg in urban soils and up to 317 Bq/kg in the flare plume for ^{40}K . In lake sediments, man-made ^{137}Cs amounted to 45.8 Bq/kg, and natural radionuclide levels were up to 62.6 Bq/kg for ^{226}Ra , 11 Bq/kg for ^{232}Th , and 268 Bq/kg for ^{40}K . The spatial distribution of natural radionuclides in urban soils and lake sediments in Monchegorsk is undoubtedly influenced by the proximity of bedrock: gneisses, crystalline schists, granodiorites, diorites, diorite-gneisses. The distribution of ^{137}Cs was likely influenced by stratospheric fallout as a result of atmospheric nuclear tests, local fallouts upon tests at the Novaya Zemlya nuclear test site, and the underground nuclear explosions Dnepr-1 and Dnepr-2.

Keywords: specific activity; urban soils; lake sediments; ^{137}Cs ; ^{40}K ; ^{226}Ra ; ^{232}Th ; Monchegorsk; Murmansk Region; public radiation safety

For citation: Iglovsky S. A., Bazhenov A. V., Yakovlev E. Yu. Patterns in the spatial distribution of natural and man-made radionuclides in urban soils and bottom sediments of lakes of Monchegorsk. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 27–41. doi: 10.17076/eco1900

Funding. The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state registration number 122011300333-1). The activities for the study of physicochemical parameters were funded within RSF grant No 20-77-10057.

Введение

Важнейшими источниками техногенной радиоактивности для территории г. Мончегорска являются стратосферные выпадения в результате атмосферных ядерных испытаний, локальные выпадения в результате испытаний на ядерном полигоне архипелага Новая Земля и аварии на Чернобыльской АЭС. Исследования предыдущих лет [Kuzmenkova, Vorobyova, 2015; Никанов и др., 2019; Мелентьев, 2021] не определили повышенных значений техногенной радиоактивности в почвах Мурманской области. Удельная активность техногенного ^{137}Cs в верхнем слое почв изменяется от 3 до 60 Бк/кг [Воробьева и др., 2017]. Кольский полуостров

является местом, потенциально опасным для загрязнения радионуклидами (рис. 1) в результате трансграничного переноса [Kuzmenkova, Vorobyova, 2015; Никанов и др., 2019; Мелентьев, 2021]. Удельная активность естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th в ненарушенных почвах Хибинской тундры составляла в болотной тундре – от 7 до 71, а в горной – от 15,1 до 27,7 Бк/кг [Никанов и др., 2019]. Так как подавляющая часть населения Арктики проживает в городах, а данных о пространственном распределении удельной радиоактивности городских почв и донных отложений озер в черте городов недостаточно, представляется необходимым изучение их состава как компонента окружающей среды человека.

Характеристика района исследования

Значительная часть города размещена на ровной территории, на отметках от 120 до 130 м над уровнем моря. Прибрежная зона оз. Нюдъявр имеет отметки от 126 до 129 м и сильно заболочена. Между оз. Лумболка, Нюдъявр и заливом Монче-губа (центральная часть города) проходит водораздел высотой от 10 до 150 м. Перешеек между оз. Нюдъявр и заливом Монче-губа возвышается на высоту от 2 до 5 м над уровнем воды в озерах. Абсолютные отметки поверхности здесь изменяются от 127 до 180 м вверх по склону. Территория города занимает 36,5 км² [Даувальтер, Кашулин, 2016].

Коренные породы залегают до глубины 30 м и выходят на дневную поверхность на вершинах и крутых склонах гор. В пределах равнинной части территории коренные породы представлены гнейсами, кристаллическими сланцами, гранодиоритами, диоритами и диорито-гнейсами, что определяет фон естественных радионуклидов [Астафьев и др., 2012]. Четвертичные отложения образованы ледниковыми, флювиогляциальными, озерно-ледниковыми и послеледниковыми образованиями. К площадям с техногенным ландшафтом относится площадка Н-1 комбината «Североникель». В разрезе морены в пределах Мончегорска присутствуют: супесь; гравелистые, разнозернистые, реже пылеватые пески; суглинок с прослоями пылеватых песков; галечниковые и щебенистые образования. Современные озерные отложения слагают низкие берега и дно озер: диатомиты дна многих озер и на восточном берегу оз. Нюдъявр (мощностью от 1,5 до 12 м); линзы суглинков и илов (мощностью от 0,5 до 4 м); пески узких пляжей (шириной не более 2 м); валуны, галька и пески береговых валов некоторых озер (до 3 м) [г. Мончегорск...]. Болотные отложения отмечаются на озерных террасах, в котловинах и других понижениях между холмами, грядами и на склонах, развиты на побережье оз. Нюдъявр и к западу от него, а также на северном побережье оз. Лумболка. Мощность торфа в основном не превышает 2 м, на некоторых участках у западного берега оз. Нюдъявр она достигает 5,3 м, в пределах полуострова, вдающегося в это озеро, составляет от 2,5 до 4 м. Котловина оз. Имандра – тектонического происхождения. Залив Монче-губа имеет ряд притоков, а вытекает из него река Монча, впадающая в оз. Лумболка. Последнее соединено с озером Роговая Ламбина и далее небольшой протокой – с Монче-губой. Озеро Нюдъявр представляет собой мелководный водоем,

соединенный протокой Нюдуй с заливом Монче-губа. Берега озера низкие, заболоченные, поросшие кустарником [Мотузова и др., 2004].

Материалы и методы

В 2018 и 2019 гг. авторы исследовали радиоэкологическую обстановку в районе г. Мончегорска. На предварительном этапе выбирались зоны отбора почвенных проб в соответствии с типом застройки, а также были определены точки отбора проб донных отложений в прилегающих к городу озерах. В результате экспедиционных работ во всех районах города отобрано 68 проб из 0–5-см слоя почвы во всех типах городской застройки, в том числе 14 подфакельных проб за чертой города, а также 25 донных проб (рис. 1). Образцы донных отложений отобраны с помощью дночерпателя размером 22×17×17 см с моторной лодки (рис. 1, D). Пробы почвы высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С. При проведении гамма-спектрометрических измерений радионуклиды ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K определялись на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре ORTEC (США) на базе коаксиального германиевого детектора GEM10P4-70 высокой чистоты (HPGe) с процессором импульсных сигналов SBS-75 и программного обеспечения Гамма-про. Разрешение гамма-спектрометра по линии 1,33 МэВ (⁶⁰Co) составило 1,75 кэВ, а относительная эффективность – 15 %. Калибровка и контроль качества гамма-спектрометрических измерений осуществлялись с использованием измерений объемной активности – сосудами Маринелли разной плотности (1 л) (RITVERZ, Россия-Германия). Каждый эталонный источник радионуклидов имел калибровочный сертификат. При подготовке счетной пробы высушенные образцы почвы и донных отложений предварительно измельчали до размера частиц < 500 мкм. Для обнаружения ²²⁶Ra и определения его активности использованы основные энергии гамма-излучения ²¹⁴Pb (351,93 кэВ) и ²¹⁴Bi (609,32; 1120,29; 1764,49 кэВ). Для идентификации ²³²Th и измерения его активности использовали основные энергии гамма-излучения ²¹²Pb (238,63 кэВ), ²²⁸Ac (911,20 кэВ) и ²⁰⁸Tl (583,19; 2614,51 кэВ). Активность радионуклида ¹³⁷Cs определяли по методу гамма-линии (661,66 кэВ). Активность радионуклида ⁴⁰K определяли с помощью энергии (1460,82 кэВ). Минимальная обнаруживаемая активность при времени воздействия t = 12 с в геометрии Маринелли для детектора GEM10P4-70 составила 0,3 Бк для ²²⁶Ra, 15,0 Бк для ⁴⁰K, 0,1 Бк для ¹³⁷Cs и 0,2 Бк для ²³²Th [Yakovlev et al., 2023].

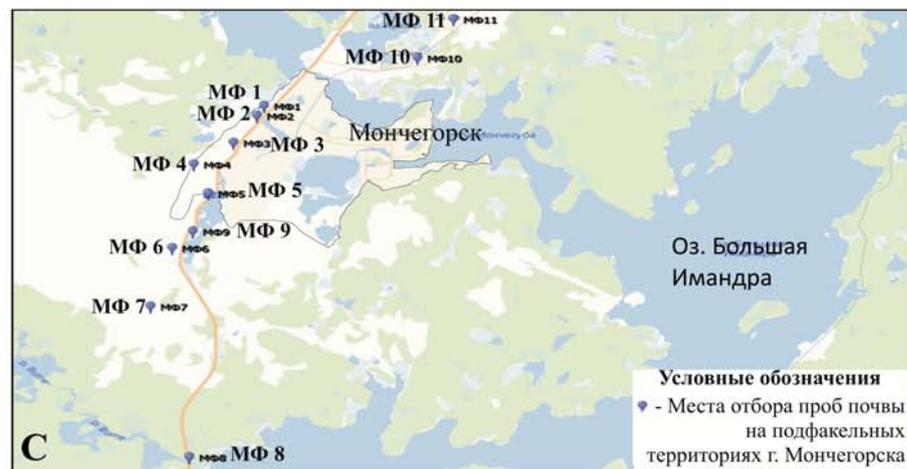


Рис. 1. Радиационно-опасные объекты на территории Кольского полуострова (А) и точки отбора почвенных образцов и донных отложений озер (В), проб почвы на подфакельных территориях (С), отбор проб озерных отложений с помощью дночерпателя с резиновой лодки (D) в г. Мончегорске в 2018–2019 гг. на фрагменте космоснимка Google

Fig. 1. Radiation hazardous objects on the territory of the Kola Peninsula (A) and sampling points for soil samples and lake bottom sediments (B), soil samples in flare areas (C), sampling of lake sediments using a bottom grab from a rubber boat (D) in the city of Monchegorsk in 2018–2019 on a fragment of a Google satellite image

Фракционный состав определялся с помощью просеивающей машины AS200 (Retsch, Германия) с набором сит от 45 мкм до 2 мм.

Автомобильные гамма-спектрометрические исследования выполнялись с использованием мобильного сцинтилляционного гамма-спектрометрического комплекса RS-700 (Канада), который имеет цифровой спектрометр с разрешением 1024 канала, позволяющий производить измерения общей радиоактивности местности через скорость счета в секунду. Измерения выполнялись на высоте 1,7 м над поверхностью земли. Спектрометр размещали в багажнике автомобиля. При гамма-спектрометрической съемке было обработано 370 точек измерений (рис. 2). Точность привязки составляла $\pm 1-1,5$ м [Mobile...].

Статистическая обработка данных включала расчет среднего арифметического значения, медианы, стандартного отклонения, стандартной ошибки среднего, среднеквадратичного отклонения по выборке, коэффициента вариации, значения *p*-value и была произведена с помощью программного обеспечения StatSoft, Inc. (2011) Statistica (data analysis software system), version 10.

Результаты и обсуждение

В Мончегорске широкое распространение получили урбиквализемы с горизонтом «урбик» – зоной аккумуляции и биогенной трансформации органо-минерального и искусственного материала, который сформировался синлитогенно под влиянием деятельности человека. В этом слое содержится не менее 10 % антропогенных включений. Реплантоземы формируются на газонах в кварталах с каменной мало- и многоэтажной застройкой, как и в соседних городах [Игловский и др., 2023а, б, в]. Хорошо сформировавшийся почвенный профиль отмечается под древесной и кустарниковой растительностью в парковых и лесных зонах [Крячюнас и др., 2020].

В зоны застройки и размещения домов малой этажности попадают точки отбора почв 6, 7, 61, 62; многоэтажных домов – 1–5, 8–16, 19, 23–28, 31–35, 43–45, 48, 49, 51–53, 55, 56, 60, 68; центра города – 24, 25, 32, 35; торговых объектов – 50, 57; учреждений здравоохранения – 65; парков и скверов – 17, 66; городских лесов, лесопарков – 20, 22, 23, 54; объектов спорта – 21, производственной сферы – 16–18, 29, 38–41, 64, 67; объектов обеспечения – 36–38, 59 (рис. 1, 2).

Максимальное значение удельной активности радионуклидов в пробах городских почв:

^{137}Cs – 31,3; ^{226}Ra – 14,2; ^{232}Th – 18,3; ^{40}K – 498 Бк/кг. Среднее значение удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th в зоне влияния площадки Н-1 комбината «Североникель» было выше, в то время как отмечалась более низкая удельная активность ^{40}K в пробах городских почв (табл. 1). Установленные более высокие значения удельной активности ^{137}Cs характерны для почв парков, елово-березовых лесопарков, расположенных вдоль Ленинградской набережной (т. 17 и 20) и в южной части города в почвах в пределах застройки многоэтажными панельными домами (т. 1). Ранее было показано [Puhakainen et al., 2005], что ^{137}Cs накапливается в подстилке.

Значения активности ^{137}Cs до 20 Бк/кг выявлены в почвах центральной и южной частей города в пределах застройки мало- и многоэтажными жилыми домами, зданиями делового, общественного и коммерческого назначения (т. 5, 6, 22, 24, 32, 33, 35, 40, 50, 54, 56, 60, 61). В остальных частях города значения удельной активности ^{137}Cs в почвах были менее 10 Бк/кг.

Распределение удельной активности естественных радионуклидов в почвах функциональных зон г. Мончегорска имеет равномерный характер (рис. 3). Максимальные значения удельной активности ^{40}K определены в почвах березового и ивового леса вблизи пересечения пр. Ленина и ул. Комарова на берегу р. Нюдау (т. 67), где отмечены также высокие значения этого параметра для ^{232}Th и ^{226}Ra . Значения удельной активности ^{40}K от 40 до 200 Бк/кг выявлены в почвах западной части в производственно-коммунальной зоне (т. 38–40, 58) и в почвах застройки мало- и многоэтажными домами в центре (т. 31, 32, 35, 36, 48, 49, 60, 64), в восточной части рядом с оз. Монча-губа (т. 14, 17, 20, 26, 28) и в южной части города (т. 5, 6, 11, 61). Низкие значения удельной активности ^{40}K (менее 40 Бк/кг) определены в почвах у озера (т. 41) и Привокзального шоссе (т. 57), а также в юго-западной части города в пределах многоэтажной панельной застройки вблизи оз. Нюдъявр (т. 1, 3).

В почвах березового и ивового леса вблизи пересечения пр. Ленина и ул. Комарова на берегу р. Нюдау (т. 67), на Привокзальном шоссе (т. 1, 38), вблизи частного деревянного сектора (т. 39), панельной застройки окрестностей морга (т. 65), ЗАГСа, центрального парка (т. 50, 66), на пересечении ул. Нюдовской и Новопроложенной на участке малоэтажной застройки (т. 51) отмечены максимальные значения удельной активности ^{226}Ra в почвах. На остальной территории города значения указанного параметра для ^{226}Ra были менее 10 Бк/кг.

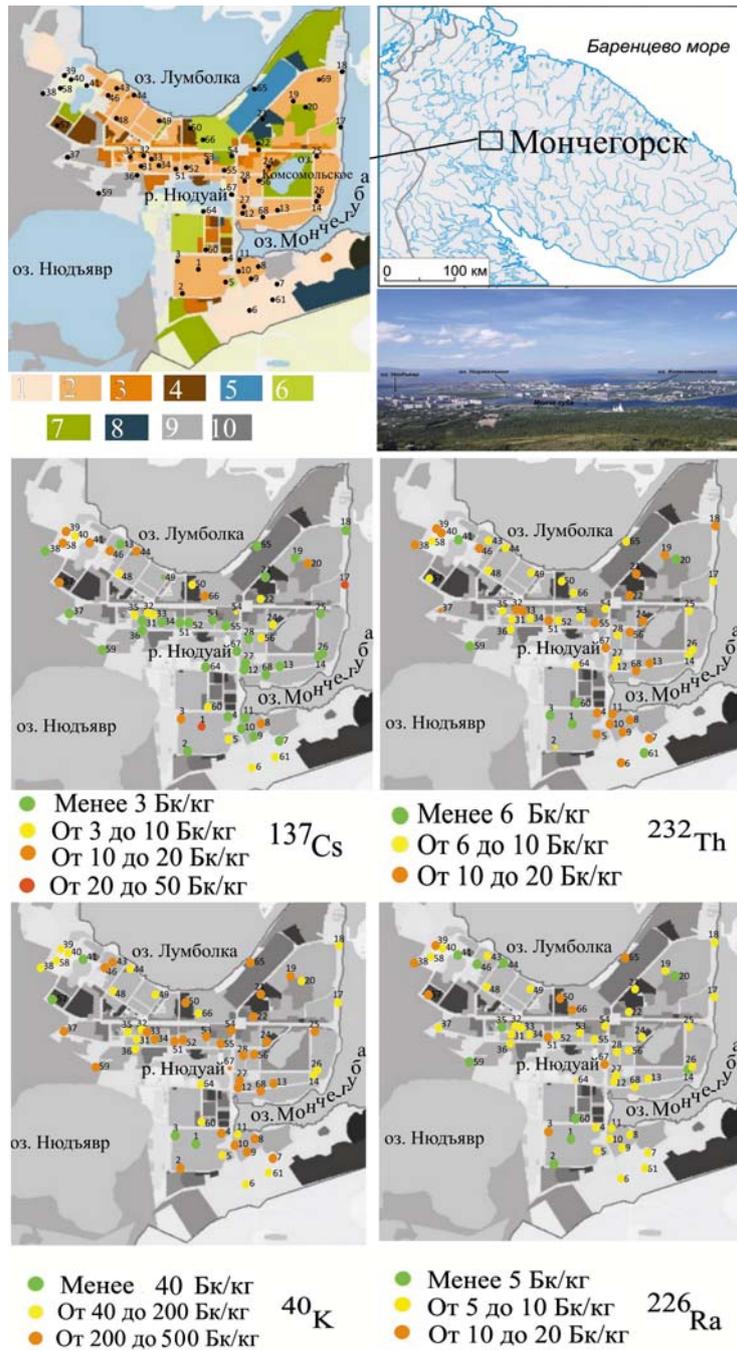


Рис. 2. Расположение точек отбора почвенных проб в г. Мончегорске на фрагменте картосхемы функционального зонирования территории [г. Мончегорск...], включая зоны:

1 – малоэтажной жилой застройки, 2 – застройки многоэтажными домами, 3 – жилой застройки центра города, 4 – размещения торговых объектов, 5 – размещения учреждений здравоохранения; 6 – парков и скверов, 7 – городских лесов, лесопарков, 8 – объектов спорта, 9 – производственно-коммунальную, 10 – размещения объектов инженерного обеспечения

Fig. 2. Location of soil sampling points in Monchegorsk on a fragment of the functional zoning map of the city territory [City of Monchegorsk...], including the zones:

1 – low-rise residential buildings, 2 – multi-storey buildings, 3 – residential buildings in the city center, 4 – retail facilities, 5 – healthcare institutions; 6 – parks and squares, 7 – urban forests, forest parks, 8 – sports facilities, 9 – industrial and communal services, 10 – engineering support facilities

Таблица 1. Удельная активность радионуклидов в пробах городской почвы, Бк/кг

Table 1. Specific activity of radionuclides in urban soil samples, Bq/kg

Радионуклиды Radionuclides	Удельная активность радионуклидов Specific activity of radionuclides					
	Городские почвы Urban soils			Почвы в зоне влияния промышленной площадки комбината «Североникель» Н-1 (точки отбора проб МФ1–МФ11 обозначены на рис. 1, С) The soils exposed to the impact of the Severonickel Combine H-1 industrial site (sampling points MF1–MF11 are marked in Fig. 1, C)		
	Минимальные и максимальные значения Minimum and maximum values	Среднее значение и стандартное отклонение Average value and standard deviation	Количество образцов выше нижнего предела обнаружения Number of samples above the lower limit of detection	Минимальные и максимальные значения Minimum and maximum values	Среднее значение и стандартное отклонение Average value and standard deviation	Количество образцов выше нижнего предела обнаружения Number of samples above the lower limit of detection
¹³⁷ Cs	3,1–31,3	11,78 ± 8,5	0	3,5–63,4	20,5 ± 21,9	6,4
²²⁶ Ra	4,7–14,2	8,08 ± 2,2;	0	5,1–21,6	6,2 ± 7,2	4,4
²³² Th	4,9–18,3	10,25 ± 2,9	10,3	5,3–17	11,1 ± 5,2	12,8
⁴⁰ K	74,8–498	212,94 ± 68,8	244	82,2–317	176 ± 91	195

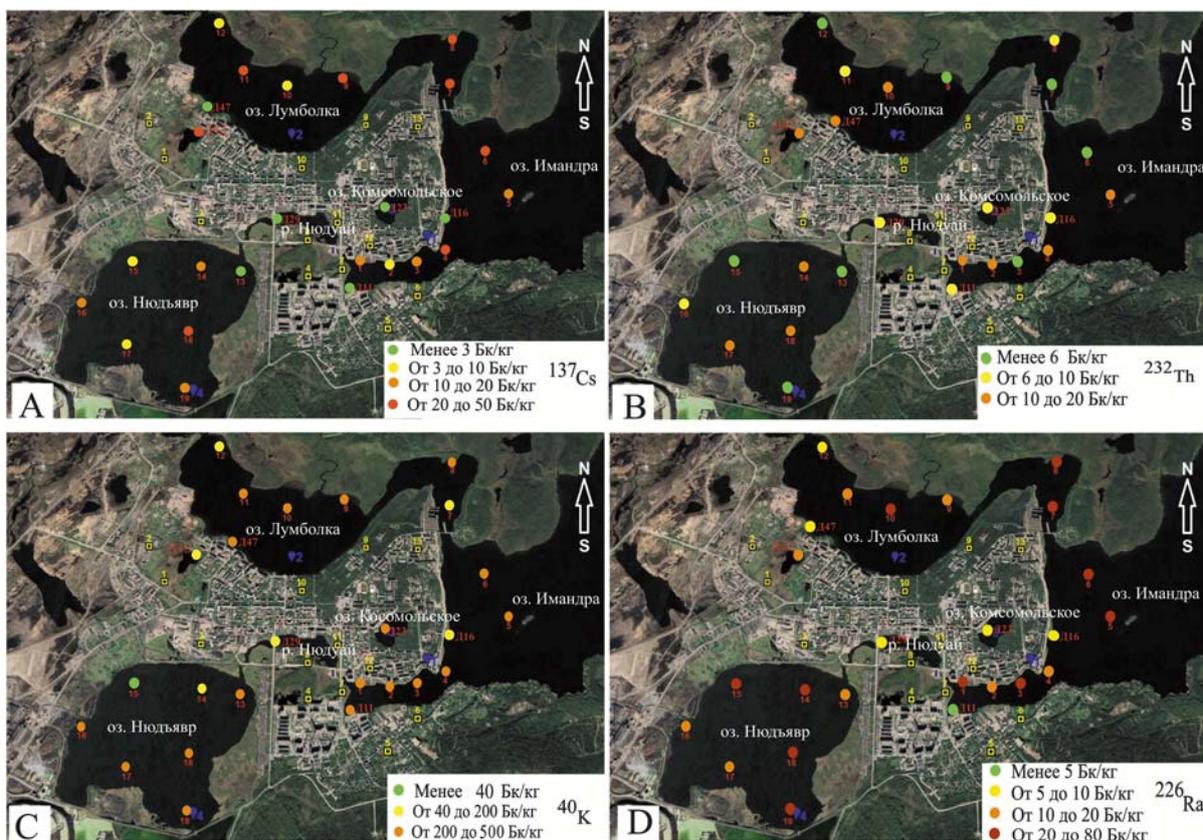


Рис. 3. Пространственное распределение удельной активности ¹³⁷Cs (А) и естественных радионуклидов в донных отложениях озер Лумболка, Нюдыавр, Комсомольское, Имандра и реки Нюдуай г. Мончегорска (Бк/кг): ²³²Th (В), ⁴⁰K (С) и ²²⁶Ra (D)

Fig. 3. Spatial distribution of specific activity of ¹³⁷Cs (A) and natural radionuclides in bottom sediments of Lakes Lumbolka, Nyudyavr, Komsomolskoye, Imandra, and the River Nyudyay of the city of Monchegorsk (Bq/kg): ²³²Th (B), ⁴⁰K (C) and ²²⁶Ra (D)

В почвах березового и ивового леса вблизи пересечения пр. Ленина и ул. Комарова на берегу р. Нюдауй (т. 67), в производственно-коммунальной зоне (т. 39), в районе малоэтажной кирпичной застройки (т. 33), вблизи многоэтажной панельной застройки (т. 4) удельная активность ^{232}Th , как и ^{226}Ra , была максимальна. Значения ^{232}Th ниже 6 Бк/кг зафиксированы в почвах парковых и лесопарковых зон, расположенных вдоль Ленинградской набережной (т. 17, 20), и в пробах торфяных отложений у безымянного озера (т. 41) и озера Нюдъявр (т. 59).

Среднее значение удельной активности ^{137}Cs (Бк/кг) в почвах вблизи многоэтажных домов составило 11,7, в пределах производственно-коммунальной зоны – 15,4, вблизи малоэтажных домов – 4,5, в районах застройки делового, общественного и коммерческого назначения – 7,6, а в зоне объектов инженерного обеспечения –

менее 3 (рис. 4). Среднее значение удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях озер Лумболка, Нюдъявр, Комсомольское, Имандра и р. Нюдауй составило 16,9 Бк/кг (рис. 5).

Распределение максимальных значений удельной активности естественных радионуклидов (Бк/кг) в донных отложениях озер выглядит следующим образом. В оз. Лумболка: ^{226}Ra – 62,6, ^{232}Th – 4,5, а распределение ^{40}K (247,7) в донных отложениях сопоставимо с таковым в почвах. В оз. Нюдъявр: ^{226}Ra – 32,9, ^{232}Th – менее 5, ^{40}K – 268. В оз. Комсомольское: ^{226}Ra – 5,8, ^{232}Th – менее 6,5, ^{40}K – 231,4. В р. Нюдауй: ^{226}Ra – 6,7, ^{232}Th – 9,1, ^{40}K – 151,5. В оз. Имандра: ^{226}Ra – 25, ^{232}Th – 7,3, ^{40}K – 265.

Распределение же средних значений удельной активности естественных радионуклидов (Бк/кг) в донных отложениях озер показало, что для ^{226}Ra это 21,8, то есть почти в 2,3 раза больше, чем в почвах, а для ^{232}Th – 10,2,

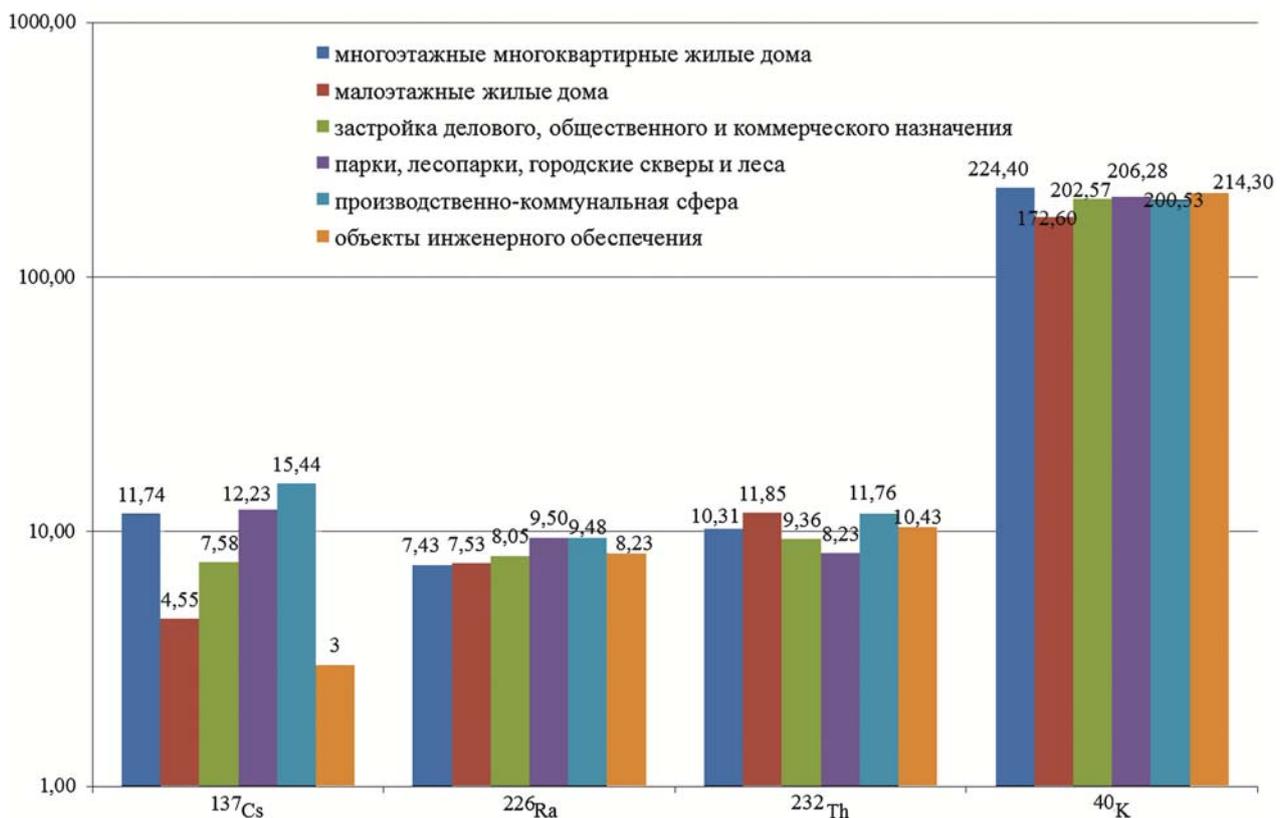


Рис. 4. Средние значения удельной активности ^{137}Cs и естественных радионуклидов (Бк/кг) в почвах функциональных зон г. Мончегорска.

Здесь и на рис. 5 использован логарифмический масштаб

Fig. 4. Average values of specific activity of ^{137}Cs and natural radionuclides (Bq/kg) in soils of the functional zones of Monchegorsk:

dark blue – multi-storey residential buildings, red – low-rise buildings, green – business, public and commercial buildings, purple – parks, forest parks, city squares and forests, blue – industrial and communal sphere, brown – engineering support facilities. Here and in Fig. 5: a logarithmic scale is used

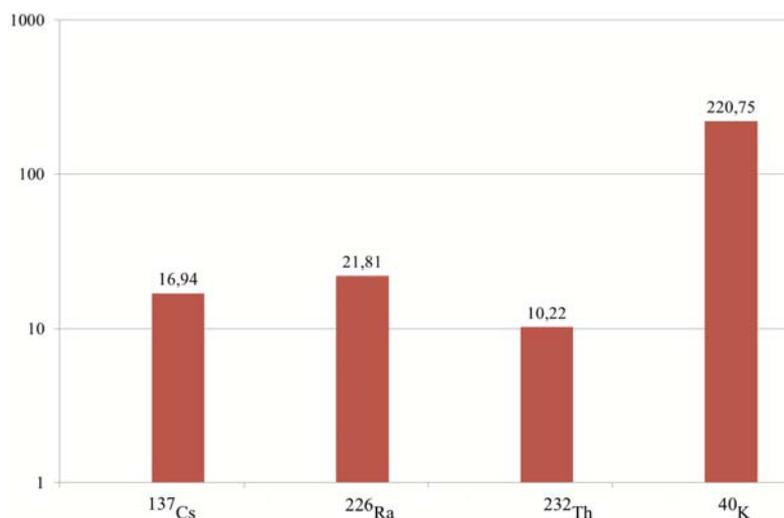


Рис. 5. Средние значения удельной активности ^{137}Cs и естественных радионуклидов (Бк/кг) в донных отложениях озер Лумболка, Нюдьярв, Комсомольское, Имандра и р. Нюдуау г. Мончегорска (n = 25)

Fig. 5. Average values of specific activity of ^{137}Cs and natural radionuclides (Bq/kg) in bottom sediments of Lakes Lumbolka, Nyudyavr, Komsomolskoye, Imandra, and the River Nyuduay, Monchegorsk (n = 25)

почти в 1,15 раза меньше, чем в почвах. Распределение ^{40}K 220,7 Бк/кг в донных отложениях озер сопоставимо с таковым в почвах.

Статистические показатели изменения удельной активности радионуклидов в почвах и в донных отложениях озер г. Мончегорска представлены в табл. 2. Среднеквадратическое отклонение позволяет оценить, насколько значения из множества могут отличаться от среднего значения. Так, в городских почвах для ^{137}Cs это отклонение меньше среднего значения, для ^{226}Ra и ^{232}Th – почти в два раза меньше, а для ^{40}K – почти в три раза меньше

среднего значения. Для ^{137}Cs совокупность оказалась неоднородной (73 %), для естественных радионуклидов – однородной (33 % или менее).

В донных отложениях оз. Лумболка, Нюдьярв, Комсомольское, Имандра и р. Нюдуау выявлено среднеквадратическое отклонение для ^{226}Ra меньше среднего значения в 1,6 раза, для ^{137}Cs – в 1,4 раза, для ^{232}Th – в 2 раза, а для ^{40}K – почти в 4,7 раза. Для ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th совокупность оказалась неоднородной (70, 62, 50 % соответственно), для ^{40}K – однородной (33 % или менее) (табл. 2).

Таблица 2. Статистические показатели изменения удельной активности радионуклидов в почвах и донных отложениях озер Лумболка, Нюдьярв, Комсомольское, Имандра и реки Нюдуау

Table 2. Statistical indicators of changes in the specific activity of radionuclides in soils and bottom sediments of Lakes Lumbolka, Nyudyavr, Komsomolskoye, Imandra, and the River Nyuduay

Статистический параметр / Statistical parameter	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Городские почвы / Urban soils				
Выборка / Sample, n	58	58	58	58
Максимум / Maximum	31,3	14,2	18,3	498
Минимум / Minimum	3,1	4,7	4,9	74,8
Среднеквадратичное отклонение по выборке / Sample standard deviation	8,6	2,2	3	69,5
Коэффициент вариации / The coefficient of variation, %	73	28	29	33
Донные отложения / Bottom sediments				
Выборка / Sample, n	25	25	25	25
Максимум / Maximum	45,8	62,6	23,5	268
Минимум / Minimum	4,1	4,3	2,8	127
Среднеквадратичное отклонение по выборке / Sample standard deviation	11,8	13,6	5	46,4
Коэффициент вариации / The coefficient of variation, %	70	62	50	21

Корреляционный анализ удельной активности радионуклидов и фракционного состава почвы (табл. 3) выявил получение корреляции с высоким уровнем статистической значимости (с учетом p-value) между ^{226}Ra и ^{137}Cs .

Аналогичный анализ удельной активности радионуклидов и содержания песка (1–2 мм, 500 мкм – 1 мм, 250–500 мкм, 125–250 мкм) и илистой фракции (45 и < 45 мкм) в донных отложениях озер (табл. 4) выявил получение корреляции с высоким уровнем статистической значимости (с учетом p-value) между ^{232}Th и фракцией 1 мм, а также отмечена корреляция с тесной связью между ^{226}Ra и фракцией < 45 мкм.

Основную часть почвенных образцов составили фракции мелкозема (мелкозернистого песка) размером 100 и 250 мкм (по 27 и 24 % соответственно). Минимальное количество было характерно для фракций от тонкой глины до среднезернистого ила (пелиты) размером < 45 мкм (5 %) (рис. 6, А). Анализ гранулометрического состава почв показал, что состав городских почв в основном представлен фракциями мелкозема размером 100, 250 и 500 мкм. Преобладают песчаные частицы (42 %), среди которых значительно содержание гравия (19 %).

Анализ отобранных проб донных отложений показал, что в исследованных озерах преобладают фракции мелко- и среднезернистого песка размером 100 мкм (27 %) и 250 мкм (21 %). Возможно, это связано с тем, что большая часть донных отложений отбиралась дночерпателем на глубинах до 10 м в прибрежной зоне озер. Фракции грубозернистого песка (1–2 мм) занимают 25 %, среднезернистого песка (250–500 мкм) – 34 % (рис. 6, В). Илистая фракция (45–100 мкм) составляет 37 %, что отмечено в [Мясникова, Потахин, 2021].

В рамках исследований Мончегорска проведена гамма-съемка местности с использованием мобильного гамма-спектрометра RS-700 [Mobile...] (рис. 7). В пределах города можно выделить три локальные зоны гамма-излучения (от 0,056 до 0,074 мкЗв/ч) (рис. 7), которое, однако, не превышает среднего по России (от 0,04 до 0,20 мкЗв/ч). Западная граница одной из этих зон расположена в районе застройки панельными многоэтажными домами в районе улиц 10-й Гвардейской дивизии и Школьной. Далее центральная зона протягивается вдоль пр. Metallургов и Комсомольской улицы до пересечения с ул. Нюдовской. Северо-восточная зона гамма-излучения приурочена к кварталу с панельными многоэтажными домами в районе Ленинградской набережной и ул. Кирова.

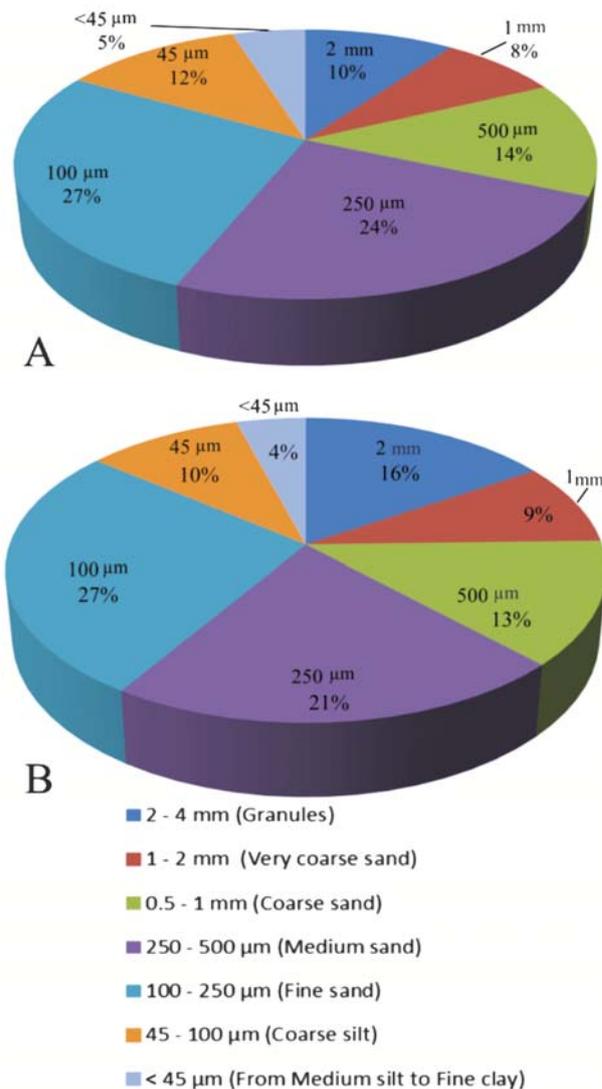


Рис. 6. Соотношение фракционного состава почв (А) и донных отложений озер Лумболка, Нюдъявр, Комсомольское, Имандра и реки Нюдуай (В) г. Мончегорска (%)

Fig. 6. The ratio of the fractional composition of soils (A) and bottom sediments of Lakes Lumbolka, Nyudyavr, Komsomolskoye, Imandra, and the River Nyuduay (B), Monchegorsk (%)

Южная зона гамма-излучения приурочена к панельным многоэтажным домам в районе улиц Грузовой и Морошковой и к югу пр. Ленина. Также можно выделить две зоны гамма-излучения с меньшими значениями на востоке города в районе пятиэтажных панельных домов на ул. Бредова и пр. Metallургов. Повышение значений гамма-излучения в Мончегорске характерно для территорий с кирпичной застройкой 70–80-х годов XX века и районов расположения малых архитектурных форм, построенных с применением гранита.

Таблица 3. Корреляционная матрица между удельной активностью радионуклидов и содержанием частиц почвенного скелета (2 мм), фракций почвенного мелкозема (менее 1 мм) в почве

Table 3. Correlation matrix between the specific activity of radionuclides and the content of soil skeleton particles (2 mm), fractions of soil fine earth (less than 1 mm) in the soil

	2 мм	1 мм	500 мкм	250 мкм	100 мкм	45 мкм	< 45 мкм	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
2 мм	1										
p-value	-										
1 мм	0,11	1									
p-value	0,40	-									
500 мкм	0,00	0,68	1								
p-value	0,98	0,00	-								
250 мкм	-0,33	-0,35	0,15	1							
p-value	0,01	0,01	0,28	-							
100 мкм	-0,65	-0,65	-0,54	0,19	1						
p-value	0,00	0,00	0,00	0,17	-						
45 мкм	-0,39	-0,23	-0,60	-0,48	0,40	1					
p-value	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	-					
< 45 мкм	0,02	-0,18	-0,55	-0,66	0,12	0,77	1				
p-value	0,87	0,18	0,00	0,00	0,39	0,00	-				
¹³⁷ Cs	0,15	-0,02	0,19	0,20	-0,18	-0,26	-0,19	1			
p-value	0,48	0,94	0,36	0,34	0,40	0,21	0,35	-			
²²⁶ Ra	-0,06	-0,17	-0,12	-0,03	0,14	0,23	0,02	0,70	1		
p-value	0,69	0,24	0,41	0,83	0,35	0,11	0,88	0,00	-		
²³² Th	0,12	-0,02	0,10	0,02	-0,10	-0,12	-0,05	-0,19	0,19	1	
p-value	0,41	0,91	0,48	0,88	0,50	0,41	0,74	0,44	0,19	-	
⁴⁰ K	0,00	-0,01	-0,18	-0,33	0,11	0,26	0,31	-0,43	-0,02	0,17	1
p-value	0,99	0,92	0,19	0,02	0,42	0,06	0,02	0,05	0,89	0,24	-

Примечание. Здесь и в табл. 4: градиенты силы связи обозначены цветом от красного с минимальным до зеленого с максимальным значением коэффициента корреляции; критические значения коэффициентов корреляции выделены полужирным шрифтом. p-value – наименьшее значение уровня значимости.

Note. Here and in Table 4: gradients of connection strength are indicated by color from red with a minimum value of the correlation coefficient to green with a maximum one; critical values of correlation coefficients are given in bold. p-value – the lowest value of the significance level.

Таблица 4. Корреляционная матрица между удельной активностью радионуклидов и содержанием песка: очень грубого (1–2 мм), грубого (500 мкм – 1 мм), среднего (250–500 мкм), мелкого (125–250 мкм) и ила (пелиты): очень грубого (45 мкм) и среднего (< 45 мкм) до тонкой глины в донных отложениях озер

Table 4. Correlation matrix between the specific activity of radionuclides and the content of sand: very coarse (1–2 mm), coarse (500 μm – 1 mm), medium (250–500 μm), fine (125–250 μm) and silt (pelites): very coarse (45 μm) and medium (< 45 μm) to fine clay in sediments of lakes

	2 мм	1 мм	500 мкм	250 мкм	100 мкм	45 мкм	< 45 мкм	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
2 мм	1										
p-value	-										
1 мм	0,54	1									
p-value	0	-									
500 мкм	0,06	0,14	1								
p-value	0,76	0,49	-								
250 мкм	-0,19	-0,28	0,37	1							
p-value	0,35	0,15	0,06	-							
100 мкм	-0,41	-0,50	-0,67	-0,04	1						
p-value	0,03	0,01	0,00	0,83	-						
45 мкм	-0,54	-0,26	-0,14	-0,41	-0,07	1					
p-value	0,00	0,19	0,49	0,03	0,74	-					
< 45 мкм	-0,40	-0,27	0,12	-0,29	-0,28	0,58	1				
p-value	0,04	0,17	0,54	0,14	0,16	0,00	-				
¹³⁷ Cs	-0,07	-0,09	0,01	-0,23	-0,16	0,38	0,33	1			
p-value	0,76	0,68	0,96	0,30	0,47	0,08	0,13	-			
²²⁶ Ra	-0,31	-0,12	0,09	-0,17	-0,19	0,48	0,52	0,43	1		
p-value	0,14	0,57	0,68	0,41	0,37	0,02	0,01	0,04	-		
²³² Th	0,09	0,62	-0,07	-0,25	-0,22	0,15	-0,21	-0,32	0,28	1	
p-value	0,69	0,00	0,75	0,27	0,33	0,51	0,36	0,20	0,23	-	
⁴⁰ K	-0,29	-0,09	-0,39	-0,54	0,37	0,36	0,24	-0,14	-0,01	0,02	1
p-value	0,17	0,66	0,06	0,01	0,08	0,09	0,25	0,56	0,95	0,94	0,17

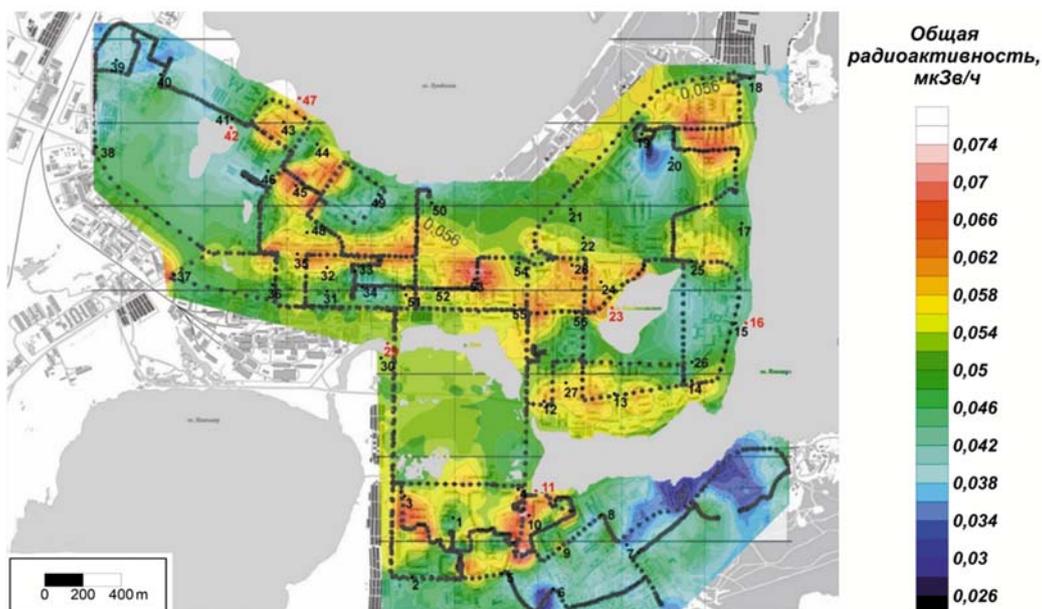


Рис. 7. Гамма-съемка территории города с использованием мобильного гамма-спектрометра RS-700. Пунктиром показаны автомобильные маршруты измерений мощности дозы гамма-излучения

Fig. 7. Gamma survey of the city territory using a mobile gamma spectrometer RS-700; gamma radiation dose rate, $\mu\text{Sv/h}$. The dotted line shows automobile routes for gamma radiation dose rate measurements

В остальных частях города значения общей гамма-активности составили менее 0,05 мкЗв/ч, а в юго-восточной (Свято-Вознесенский кафедральный собор) и северо-западной частях города значения были менее 0,03 мкЗв/ч (рис. 7).

Выводы

1. Полученные оригинальные данные по удельной активности техногенного ^{137}Cs в почвах г. Мончегорска не превышают значений глобального радиоактивного фона и характерных для исследуемой территории. На его пространственное распределение могли оказать влияние выпадения в результате стратосферного переноса радиоактивности в результате ядерных испытаний на земном шаре, а также испытания на ядерном полигоне архипелага Новая Земля и антропогенный фактор. На пространственное распределение и активность естественных радионуклидов (^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K) в почвах г. Мончегорска влияние оказывают близкое залегание горных пород, которые представлены гнейсами, кристаллическими сланцами, гранодиоритами, диоритами и диорито-гнейсами, привнесение в почвенный покров строительного мусора, перемешивание почвы во время застройки территории (рекультивационные работы).

2. При анализе внутригородского распределения радионуклидов выяснено, что максимальное значение удельной активности ^{137}Cs 31,3 Бк/кг отмечалось в городской черте в почвах в пределах распространения производственно-коммунальной сферы. Среднее значение удельной активности ^{137}Cs в почвах вблизи многоквартирных домов составило 11,7 Бк/кг, производственно-коммунальной сферы – 15,4 Бк/кг, малоэтажных домов – 4,5 Бк/кг, застройки делового, общественного и коммерческого назначения – 7,6 Бк/кг, объектов инженерного обеспечения – менее 3 Бк/кг. Распределение средних значений удельной активности естественных радионуклидов в почвах функциональных зон г. Мончегорска имеет равномерный характер, причем распределение ^{232}Th (11,8 Бк/кг) в почвах вблизи малоэтажных домов и ^{226}Ra (9,5 Бк/кг) в почвах парков и лесопарков имеет схожий характер. Средние значения удельной активности ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th в зоне влияния площадки Н-1 комбината «Североникель» на подфакельных территориях были выше, чем в городе. Возможно, это связано с периодическим обновлением почвенного покрова в этой зоне в результате рекультивационных работ.

3. Гамма-съемка территории г. Мончегорска не выявила аномалии радиационного фона.

Мощность дозы гамма-излучения территории города не превышает 0,074 мкЗв/час, что меньше значений по России (от 0,04 до 0,20 мкЗв/ч). Повышение значений характерно для территорий с кирпичной застройкой 70–80-х годов XX века и районов расположения малых архитектурных форм, построенных с применением гранита. В целом радиационная обстановка в городе вполне благополучная. Пониженные фоновые значения характерны для городских окраин, пустырей, парковых зон и спортивных площадок. Высоко- и среднеэтажные жилые массивы и промышленные территории характеризуются более высокими значениями. Подобные колебания гамма-фона связаны в первую очередь с особенностями применяемых при строительстве материалов – кирпича, щебня, наполнителей асфальта.

4. Основную часть анализируемых почвенных образцов составили фракции мелко- и среднезернистого песка с размером частиц 100 и 250 мкм (по 27 и 24 % соответственно), минимальное количество – с размером < 45 мкм (5 %). В донных отложениях озер также преобладают фракции мелко- и среднезернистого песка размером 100 и 250 мкм – по 27 и 21 % соответственно, 1–2 мм – 25 %, 250–500 мкм – 34 %. Илистая фракция (45–100 мкм) составляет 37 %.

5. Анализ радиоактивности и фракционного состава почвы выявил получение корреляции с высоким уровнем статистической значимости (с учетом p-value) между ^{226}Ra и ^{137}Cs . Анализ удельной активности радионуклидов и содержания песка и илистой фракции в донных отложениях озер выявил корреляцию с высоким уровнем статистической значимости между ^{232}Th и фракцией 1 мм. Также была отмечена корреляция с тесной связью между ^{226}Ra и фракцией < 45 мкм.

6. Максимальное значение активности ^{137}Cs в донных отложениях озер Лумболка, Нюдъявр, Комсомольское, Имандра, р. Нюдауй составило 45,8 Бк/кг при среднем 16,9 Бк/кг. Распределение же средних значений активности естественных радионуклидов в донных отложениях показало для ^{226}Ra величину 21,8 Бк/кг, что в 2,2 раза больше, чем в почвах, а для ^{232}Th – 10,2 Бк/кг, что в 1,5 раза меньше по сравнению с почвами. Распределение ^{40}K (220,7 Бк/кг) в донных отложениях озер сопоставимо с таковым в почвах.

Литература

Астафьев Б. Ю., Богданов Ю. Б., Воинова О. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье

поколение). Серия Балтийская. Лист Q-(35), 36 Аптиты. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 436 с.

Воробьева Т. А., Евсеев А. В., Кузьменкова Н. В. Радиогеохимические исследования состояния ландшафтов Кольского полуострова // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2(26). С. 17–26. doi: 10.25283/2223-4594-2017-2-17-26

г. Мончегорск с подведомственной территорией [Электронный ресурс]. URL: <https://monchegorsk.gov-murman.ru/vlast/administratsiya/sostav/otdel-arkhitektury-i-gradostroitelstva/generalnyy-plan-goroda-monchegorska/generalnyy-plan-goroda-monchegorska> (дата обращения: 16.04.2024).

Даувальтер В. А., Кашулин Н. А. Тяжелые металлы в донных отложениях озер центральной и юго-западной частей Мурманской области // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3(26). С. 73–88.

Игловский С. А., Баженов А. В., Крячюнас В. В., Яковлев Е. Ю. Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах города Кировска (Мурманская область) // Арктика: экология и экономика. 2023а. Т. 13, № 3. С. 473–481. doi: 10.25283/2223-4594-2023-3-473-481

Игловский С. А., Баженов А. В., Яковлев Е. Ю. Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Полярные Зори (Мурманская область) // Вестник геонаук. 2023б. № 10. С. 51–57. doi: 10.19110/geov.2023.10.6

Игловский С. А., Баженов А. В., Яковлев Е. Ю. Пространственное распределение ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Оленегорск (Мурманская область) // Почвы и окружающая среда. 2023в. Т. 6, № 4. e225. doi: 10.31251/pos.v6i4.225

Крячюнас В. В., Кузнецова И. А., Котова Е. И., Игловский С. А., Мироненко К. А., Суханов С. Г. Содержание и особенности распределения естественных и техногенных радионуклидов в почвах малого арктического города // Экология человека. 2020. № 5. С. 11–20. doi: 10.33396/1728-0869-2020-5-11-20

Мелентьев Г. Б. Естественная радиоактивность редкометалльно-специализированного минерального сырья и урбанизированных территорий Карело-Кольского региона как фактор их радиоэкологической оценки // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 2. С. 27–43. doi: 10.17076/geo1284

Мотузова Г. В., Лукина Н. В., Никонов В. В., Даувальтер М. В., Зорина А. В. Влияние природных и техногенных факторов на почвы, почвенные и грунтовые воды Кольского полуострова // Водные ресурсы. 2004. Т. 31, № 3. С. 325–331.

Мясникова Н. А., Потахин М. С. Гранулометрический состав донных отложений озера Торосьярви (бассейн Белого моря) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. 2021. № 1. С. 45–56. doi: 10.17308/geo.2021.1/3255

Никанов А. Н., Гудков А. Б., Шелков М. В., Попова О. Н., Щербина Ф. А., Щербина А. Ф. Характеристика радиационного фона арктической территории в районе расположения горно-обогатительного комплекса // Экология человека. 2019. № 5. С. 11–14. doi: 10.33396/1728-0869-2019-5-11-14

Kuzmenkova N., Vorobyova T. Landscape-geochemical mapping of territory in the north-west of Kola Peninsula // *J. Geochem. Explor.* 2015. No. 154. P. 194–199. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.12.016

Mobile radiometric control system RS-700. URL: <http://www.radiationsolutions.ca/wp-content/uploads/2019/02/RS700-Feb-2019.pdf> (дата обращения: 16.04.2024).

Puhakainen M., Heikkinen T., Steinnes E., Thørring H., Outola I. Distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in Arctic soil profiles polluted by heavy metals // *J. Environ. Radioact.* 2005. Vol. 81(2-3). P. 295–306. doi: 10.1016/j.jenvrad.2005.01.006

Yakovlev E., Puchkov A., Druzhinin S. Evaluation of current natural and anthropogenic radionuclide activity in coastal area bottom sediments of the Barents Sea (North of the Kola Peninsula) // *Mar. Pollut. Bull.* 2023. Vol. 189. Art. 114809. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.114809

References

Astaf'ev B. Yu., Bogdanov Yu. B., Voinova O. A. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Baltic series. Sheet Q-(35), 36 – Apatity. Explanatory letter. St. Petersburg: VSEGEI; 2012. 436 p. (In Russ.)

City of Monchegorsk and its administered area. URL: <https://monchegorsk.gov-murman.ru/vlast/administratsiya/sostav/otdel-arkhitektury-i-gradostroitelstva/generalnyy-plan-goroda-monchegorska/generalnyy-plan-goroda-monchegorska> (accessed: 16.04.2024).

Dauval'ter V. A., Kashulin N. A. Heavy metals in lake sediments of the central and southwest parts of the Murmansk Region. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Herald of the Kola Science Centre of the RAS.* 2016;3(26):73–88. (In Russ.)

Iglovskii S. A., Bazhenov A. V., Kryauchyunas V. V., Yakovlev E. Yu. Features of the spatial distribution of ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th in the soils of the city of Kirovsk (Murmansk Region). *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2023;13(3):473–481. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2023-3-473-481

Iglovskii S. A., Bazhenov A. V., Yakovlev E. Yu. Specific spatial distribution of ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th in soils of the city of Polyarnyye Zori (Murmansk Region). *Vestnik geonauk = Vestnik of Geosciences.* 2023;10(346):51–57. (In Russ.). doi: 10.19110/geov.2023.10.6

Iglovskii S. A., Bazhenov A. V., Yakovlev E. Yu. Spatial distribution of ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th in soils of the city of Olenegorsk (Murmansk Region). *Pochvy i okruzhayushchaya sreda = The Journal of Soils and Environment.* 2023;6(4):e225. (In Russ.). doi: 10.31251/pos.v6i4.225

Kryauchyunas V. V., Kuznetsova I. A., Kotova E. I., Iglovskii S. A., Mironenko K. A., Sukhanov S. G. Natural and technogenic radionuclides in soils in a small Russian arctic town. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology.* 2020;5:11–20. (In Russ.). doi: 10.33396/1728-0869-2020-5-11-20

Kuzmenkova N., Vorobyova T. Landscape-geochemical mapping of territory in the north-west of Kola Peninsula. *J. Geochem. Explor.* 2015;154:194–199. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.12.016

Melent'ev G. B. Natural radioactivity of rare-metal specialized mineral raw materials and urbanized areas in the Karelian-Kola region as a factor in their radioecological assessment. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2021;2:27–43. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1284

Mobile radiometric control system RS-700. URL: <http://www.radiationsolutions.ca/wp-content/uploads/2019/02/RS700-Feb-2019.pdf> (accessed: 16.04.2024).

Motuzova G. V., Lukina N. V., Nikonov V. V., Dauval'ter M. V., Zorina A. V. Influence of natural and technogenic factors on soils, soil and groundwater of the Kola Peninsula. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2004;31:3:325–331. (In Russ.)

Myasnikova N. A., Potakhin M. S. Granulometric composition of bottom sediments of Lake Torosyarvi (White Sea basin). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology.* 2021;1:45–56. (In Russ.). doi: 10.17308/geo.2021.1/3255

Nikanov A. N., Gudkov A. B., Shelkov M. V., Popova O. N., Shcherbina F. A., Shcherbina A. F. Characteristics of the radiation background of the Arctic territory in the area of the mining and processing complex. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology.* 2019;5:11–14. (In Russ.). doi: 10.33396/1728-0869-2019-5-11-14

Puhakainen M., Heikkinen T., Steinnes E., Thørring H., Outola I. Distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in Arctic soil profiles polluted by heavy metals. *J. Environ. Radioact.* 2005;81(2-3):295–306. doi: 10.1016/j.jenvrad.2005.01.006

Vorob'eva T. A., Evseev A. V., Kuz'menkova N. V. Radiogeochemical studies of the state of the landscapes of the Kola Peninsula. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy.* 2017;2:(26):17–26. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2017-2-17-26

Yakovlev E., Puchkov A., Druzhinin S. Evaluation of current natural and anthropogenic radionuclide activity in coastal area bottom sediments of the Barents Sea (North of the Kola Peninsula). *Mar. Pollut. Bull.* 2023;189:114809. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.114809

Поступила в редакцию / received: 17.04.2024; принята к публикации / accepted: 29.11.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Игловский Станислав Анатольевич

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

e-mail: iglovskys@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Iglovsky, Stanislav

Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher

Баженов Александр Викторович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
лаборатории экологической радиологии
Института геодинамики и геологии

e-mail: abv-2009@yandex.ru

Яковлев Евгений Юрьевич

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

e-mail: yakov24lev99@mail.ru

Bazhenov, Alexander

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Yakovlev, Evgeny

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory
of Ecological Radiology, Institute of Geodynamics
and Geology

УДК 581.524.3

ДИНАМИКА РЕКРЕАЦИОННЫХ СОСНЯКОВ В ЗАКАЗНИКЕ «ОЗЕРО ЩУЧЬЕ» (Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ)

В. Н. Добронравина*, Е. А. Волкова, В. Н. Храмцов

Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН (ул. Профессора Попова, 2В,
Санкт-Петербург, Россия, 197022), *dobronravina.v@yandex.ru

Сосновые леса в окрестностях озера Щучье (г. Санкт-Петербург) более 60 лет подвергаются активной рекреационной нагрузке. В статье приводятся данные о динамике всех ярусов рекреационных сосняков, полученные в результате 11-летних наблюдений на двух постоянных пробных площадях, заложенных одновременно с образованием заказника «Озеро Щучье». Мониторинг природных комплексов проводился сотрудниками Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН и Санкт-Петербургского государственного университета в 2011, 2014 и 2022 гг. Исследования показывают, что в сосновом древостое идет процесс самоизреживания за счет тонкомера сосны (*Pinus sylvestris* L.) при одновременном увеличении запаса и сохранении мелколиственных пород. Присутствие благонадежного подростка ели (*Picea abies* (L.) Karst.) во всех градациях высоты и постоянный рост его численности позволяет предположить дальнейшее усиление роли этой породы в древостое. За время наблюдений значительно выросла численность подлеска, в основном за счет рябины (*Sorbus aucuparia* L.). Общее видовое разнообразие увеличилось главным образом в связи с заметным притоком мохообразных, растущих на почве и комлях деревьев. В обоих сообществах наблюдается увеличение проективного покрытия у видов сосудистых растений бореальнолесной группы при сохранении или уменьшении числа видов и обратная тенденция у видов опушечно-лесной группы (сокращение покрытия при сохранении или увеличении числа видов). Незадренованная почва постепенно зарастает пионерной растительностью, зелеными мхами и черникой (*Vaccinium myrtillus* L.). Однако сообщества продолжают находиться на тех же стадиях рекреационной нарушенности, что и в начале наблюдений, и статистически значимых изменений в видовом составе и среднем проективном покрытии напочвенных видов по данным NMDS-ординации за прошедший период не выявлено. Все это свидетельствует о том, что для восстановления растительного покрова в условиях сохраняющейся (хотя и снизившейся) рекреационной нагрузки требуется более длительное время.

Ключевые слова: сосняки; рекреация; динамика; видовой состав; горизонтальная структура нижних ярусов; NMDS-ординация

Для цитирования: Добронравина В. Н., Волкова Е. А., Храмцов В. Н. Динамика рекреационных сосняков в заказнике «Озеро Щучье» (г. Санкт-Петербург) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 42–50. doi: 10.17076/eco1980

Финансирование. Публикация подготовлена по результатам исследований, выполненных в рамках государственного задания Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН «Растительность Европейской России и Северной Азии: разнообразие, динамика, принципы организации» (рег. № 121032500047-1).

V. N. Dobronravina*, E. A. Volkova, V. N. Khramtsov. DYNAMICS OF RECREATIONAL PINE STANDS IN OZERO SHCHUCHYE NATURE RESERVE (ST. PETERSBURG)

*Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences (2B Professora Popova St., 197022 St. Petersburg, Russia), *dobronravina.v@yandex.ru*

Pine forests near Lake Shchuchye in St. Petersburg have been under intensive recreational pressure for more than 60 years. The article presents data on the dynamics of all layers of the recreational pine forests gathered during 11 years of observations at two permanent sample plots laid down at the same time the nature reserve Ozero Shchuchye was established. Monitoring was carried out by researchers from Komarov Botanical Institute and St. Petersburg State University in 2011, 2014 and 2022. The study shows an ongoing process of self-thinning in the stands (mostly thin pines are falling) simultaneously with an increase in standing stock and persistence of small-leaved tree species. The presence of viable *Picea abies* (L.) Karst. advance regeneration of all height classes and its constantly growing amount suggest the contribution of this species will continue to grow. Undergrowth abundance has increased significantly during the observations, mainly due to *Sorbus aucuparia*. The overall species diversity has increased mainly due to the noticeable arrival of ground- and trunk-dwelling bryophytes. Both communities exhibited an increase in the percentage cover of boreal vascular species while the number of the species remained unchanged or decreased. The situation for forest-edge species was the opposite – declining percentage cover with a simultaneous increase in the number of species. Bare soil is gradually getting overgrown with pioneer vegetation, true mosses and *Vaccinium myrtillus*. However, the communities remain in the same stages of recreational disturbance as at the beginning of observations, with no significant changes in the species composition or average percentage covers of ground-dwelling species over the past period according to NMDS ordination data. All these facts prove that vegetation recovery under persisting (although reduced) recreational pressure takes more time.

Keywords: pine forests; recreation; dynamics; species composition; ground vegetation horizontal structure; NMDS ordination

For citation: Dobronravina V. N., Volkova E. A., Khramtsov V. N. Dynamics of recreational pine stands in Ozero Shchuchye Nature Reserve (St. Petersburg). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 42–50. doi: 10.17076/eco1980

Funding. The paper is based on the research carried out under state assignment to the Komarov Botanical Institute RAS «Vegetation of European Russia and Northern Asia: diversity, dynamics, principles of organization» (ID 121032500047-1).

Введение

Одной из неотъемлемых функций городских охраняемых природных территорий является рекреационная. Пребывание на природе оказывает на человека благоприятное физическое и эмоционально-психологическое воздействие, помогает поддерживать его здоровье и работоспособность [Реймерс, 1990; Рысин, 2012; Вахрушева, 2019]. Воздействие рекреации на леса Санкт-Петербурга активно исследовалось с конца 1970-х годов [Савицкая, 1978; Дыренков, 1983], однако основное внимание уделялось изучению разных аспектов (в т. ч. скорости) деградации лесов, а не их восстановления после полного или частичного снятия нагрузки.

Заказник «Озеро Щучье» находится на северном побережье Финского залива неподалеку

от поселка Комарово. Он организован в 2011 г. с целью сохранения и восстановления таежных лесов. Активное рекреационное использование этих территорий началось во второй половине XX века с образованием Курортной зоны Ленинграда; основные нагрузки в летний период приходятся на побережья озер Щучье и Дружинное, в зимний – на камовые холмы. В этих местоположениях растут кустарничково-зеленомошные сосняки высокой рекреационной привлекательности [Природа..., 2017; Государственный...]. В 2008 г. вокруг озера был создан тестовый полигон, на котором проводятся исследования рекреационной нагрузки и рекреационной нарушенности территории. Установлено, что в наибольшей степени дигрессия затронула природные комплексы камовых холмов с пологими склонами и волнистых равнин, сложенных песками, с сосновыми и елово-

сосновыми кустарничково-зеленомошными лесами. За 11 лет исследований рекреационная нагрузка значительно сократилась благодаря полному запрету въезда автомобилей на территорию заказника (в 2008 г. в дни пиковых нагрузок на 100 м береговой линии приходилось в среднем 9 автомобилей, в 2018 г. – 0); площадь сильно нарушенных участков уменьшилась в два раза [Исаченко и др., 2020].

Целью работы было изучение процесса деградации в сосновых лесах Санкт-Петербурга при снижении антропогенной (рекреационной) нагрузки на фоне естественной возрастной динамики древостоя. Проведен анализ изменений во всех ярусах растительности, а также в видовом составе и структуре нижних ярусов рекреационных сосняков заказника «Озеро Щучье» за 11 лет (с 2011 по 2022 г.).

Материалы и методы

Динамика растительности, долгое время подвергавшейся избыточной рекреационной нагрузке, исследовалась на двух постоянных пробных площадях (ППП), заложенных одновременно с образованием заказника. Пробная площадь «Озеро Щучье-2» (ОЩ-2) размером 50×50 м расположена в сосняке кустарничково-зеленомошном (на 2022 г. средний возраст древостоя 118 лет, III класс бонитета) в пределах склона камового холма (уклон до 7°), сложенного малощебнистыми разнозернистыми песками. До 2011 г. проходящая через ППП лесная дорога активно использовалась автомобилистами; как следствие, растительный покров в западной части был практически уничтожен. Сосняк на ОЩ-2 перед началом наблюдений находился на III стадии рекреационной нарушенности (сильно нарушенное состояние; вытоптано более 10, но менее 50 % площади) [Исаченко и др., 2020].

Пробная площадь «Озеро Щучье-3» (ОЩ-3) размером 50×50 м находится юго-восточнее, в сосняке кустарничково-зеленомошном (на 2022 г. средний возраст древостоя 51 год, I класс бонитета) на пологом склоне камового холма (уклон до 5°) из мелкозернистых песков. Ее положение вблизи берега оз. Щучье обуславливает интенсивную рекреационную нагрузку: через площадку проходит несколько троп, до 2011 г. на ней массово останавливались автомобили, находились кострища. В результате напочвенная растительность занимала всего 24 % площадки, что соответствует IV стадии рекреационной нарушенности (деградация растительного покрова) [Природа..., 2017; Исаченко и др., 2020].

Для анализа были использованы данные мониторинга, проведенного авторами и сотрудниками Санкт-Петербургского государственного университета в 2011, 2014 и 2022 гг. На каждой ППП проводили таксацию древостоя (полный пересчет деревьев по породам, измерение их диаметра и высоты, оценка состояния по шкале от 1 (без признаков ослабления) до 7 (высокий пеня)), подроста и подлеска (полный пересчет по породам и четырем градациям высоты); выявляли полный флористический состав (сосудистые растения дополнительно распределяли по эколого-ценотическим группам согласно [Смирнов и др., 2006] с учетом местных особенностей и подсчитывали число видов в каждой группе); определяли проективное покрытие видов травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов на учетных площадках 1×1 м в 20-кратной повторности. Для выявления изменений в горизонтальной структуре нижних ярусов сообществ наносили все микрогруппировки на план в масштабе 1:100 по размеченным на местности квадратам со стороной 5 м [Храмцов и др., 2011]. Названия сосудистых растений приводятся по: [Черепанов, 1995], мохообразных – по: [Hodgetts et al., 2020], лишайников – по: [Westberg et al., 2021].

Постоянство флористического состава за все время наблюдений определяли по значению индекса биотической дисперсии Коха [Koch, 1957] для всех зафиксированных на ППП видов, а также отдельно для сосудистых растений, мохообразных и лишайников (для второй и третьей группы учитывались виды на всех субстратах). Значение, дополняющее общее постоянство флористического состава до 100 %, рассматривалось как общее обновление флоры. Для выявления наличия/отсутствия динамики на основе данных о видовом составе и проективном покрытии напочвенных видов были построены NMDS-ординации с единственным фактором «год» и дистанцией Брея – Кертиса в качестве меры несходства. Использовались функции пакета «vegan» языка R [Oksanen et al., 2013]. Планы горизонтальной структуры были оформлены в ГИС MapInfo.

Результаты и обсуждение

На обеих ППП наблюдается увеличение запаса древостоя со средними приростами 2,9 и 7,1 м³/га в год соответственно. Прирост запаса на ОЩ-2 превышает средние показатели, характерные для III класса бонитета (1,9 м³/га в год), и находится ближе к показателям, указанным для нормальных (полных) древостоев (3,6 м³/га в год); прирост запаса на ОЩ-3 со-

ответствует справочным данным для нормальных (полных) древостоев I класса бонитета [Швиденко и др., 2008]. Соотношение пород по запасу (98С2Б+Е для ОЩ-2 и 79С20Б1Ос для ОЩ-3) на обеих ППП не изменяется за все время наблюдений.

Число деревьев на ОЩ-3 стабильно уменьшается: с 2011 г. выпало 15 % изначального древостоя. Число деревьев на ОЩ-2 уменьшилось незначительно, т. к. из древостоя выпало 15 экземпляров сосны, а перешло из подроста в древостой 10 экземпляров различных видов (5 елей, 4 сосны и 1 береза). Выпадают в основном тонкомерные сосны, иногда березы. На обеих ППП сохраняется присутствие мелколиственных пород (березы на обеих ППП и осины на ОЩ-3).

По состоянию на обеих ППП во все периоды наблюдений доминируют деревья 1 категории (без признаков ослабления). Тем не менее их доля в общем числе деревьев снизилась с 73 до 62 % на ОЩ-2 и с 86 до 56 % на ОЩ-3. Доля сухостоя от числа живых деревьев выросла с 4 до 11 % на ОЩ-2 и фактически с нуля до 14 % на ОЩ-3. Все это свидетельствует об изреживании древостоя.

Подрост на обеих ППП представлен как хвойными, так и мелколиственными породами; на ОЩ-2 доминируют сосна и береза, на ОЩ-3 – осина, в 2022 г. в сочетании с ивой козьей и елью. Численность подроста на ОЩ-2 за 11 лет уменьшилась почти в 3 раза (с 3500 до 1300 шт./га); сокращение наблюдается у всех пород, кроме ели. Основной подрост сосредоточен в градации высоты 0,5–1,5 м. С учетом наличия благонадежного подроста ели во всех градациях высоты ожидается усиление ее роли в древостое. На ОЩ-3 численность подроста за 11 лет увеличилась примерно в 2 раза (с 900 до 1700 шт./га), по большей части за счет ели и ивы козьей. Основной подрост сосредоточен в градации высоты до 0,5 м. С 2011 г. сохраняется единичный экземпляр пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) высотой до 0,5 м.

Ярус подлеска на обеих ППП не сформирован, численность его мала, но с 2011 г. постоянно увеличивается: на ОЩ-2 она выросла более чем в 2 раза, на ОЩ-3 – на треть. На ОЩ-2 в подлеске представлена только рябина. Основная ее численность до 2022 г. приходилась на градацию до 0,5 м, в 2022 г. она примерно поровну распределилась между градациями до 0,5 м и 0,5–1,5 м. На ОЩ-3 подлесок сформирован рябиной (78 % численности), крушиной (*Fragula alnus* Mill.), можжевельником (*Juniperus communis* L.) и ивой ушастой (*Salix aurita* L.). Основная численность подлеска за все время наблюдения приходится на градацию 0,5 м;

за 11 лет значительно выросла доля подлеска в градации 1,6–3,0 м, с 3 до 21 %.

За все время наблюдения на ОЩ-2 отмечено 129 видов растений, из них 28 – сосудистых (в частности, 6 видов деревьев, 5 – кустарничков и 17 – трав), 32 – мохообразных и 69 – лишайников (виды второй и третьей группы учитывались на всех субстратах). На ОЩ-3 отмечен 181 вид, из них 59 – сосудистых (в частности, 11 видов деревьев, 3 – кустарничков, 4 – кустарничков и 41 – трав), 33 – мохообразных и 89 – лишайников (виды второй и третьей группы также учитывались на всех субстратах). Общее обновление флоры за 11 лет на ОЩ-2 составило 38 %, на ОЩ-3 – 35 %. На обеих ППП оно происходит по большей части за счет мохообразных.

Состав сосудистых растений ОЩ-2 характеризуется относительной стабильностью (индекс биотической дисперсии Коха (ИБД) – 77 %). В основном они принадлежат к опушечно-лесной и бореальнолесной эколого-ценотическим группам. Их проективное покрытие и число видов изменяются разнонаправленно: при относительно постоянном (8–9) числе видов опушечно-лесной группы ее покрытие с 2011 г. сократилось на треть (с 6,5 до 4,6 %), в то время как в бореальнолесной группе наблюдается обратная тенденция: покрытие выросло почти в 2 раза, с 17,9 до 29,2 %, при уменьшении числа видов. За время наблюдения на ППП появились виды, типичные для сухих сосняков (*Carex ericetorum* Poll., *Festuca ovina* L.) [Заугольнова, Мартыненко, 2014], на незадернованной поверхности – виды нарушенных местообитаний (*Agrostis tenuis* Sibth., *Juncus tenuis* Willd.) [Природа..., 2017].

Состав сосудистых растений ОЩ-3 более изменчив (ИБД – 64 %) за счет как активного притока видов, так и частично их неустойчивого присутствия (около 20 % видов то появляются, то исчезают). На ППП представлено 8 эколого-ценотических групп; по числу видов доминирует опушечно-лесная группа, по проективному покрытию – бореальнолесная. Здесь так же, как и на ОЩ-2, наблюдаются две противоположные тенденции: при постоянном увеличении числа видов опушечно-лесной группы ее покрытие колеблется незначительно, а у бореальнолесной при относительно постоянном числе видов (5–7) покрытие за время наблюдения выросло более чем на 60 % (с 14 до 22 %). Увеличилось количество видов в луговой и опушечно-луговой группах (с 3 до 7 в каждой), но их покрытие остается незначительным (в среднем 2 % на группу). За время наблюдения на ППП появились как типично лесные (*Anemonoides nemorosa* (L.) Holub, *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.), так и луговые и пионерные виды (*Amorpha repens* (L.) C. Presl,

Dactylis glomerata L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Tussilago farfara* L.). Незадернованная поверхность зарастает *Agrostis tenuis*, *Juncus tenuis*, *Festuca rubra* L. [Природа..., 2017].

Состав мохообразных ОЩ-2 за время наблюдения значительно изменился (ИБД – 40 %), увеличившись с 2011 г. в 2 раза в основном за счет напочвенных видов, что свидетельствует о снижении рекреационной нагрузки. Незадернованная почва зарастает типичными видами нарушенных местообитаний (*Pogonatum urnigerum* (Hedw.) P. Beauv., *Pohlia* spp. Hedw., *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.). Состав мохообразных ОЩ-3 изменился несколько меньше (ИБД – 53 %), за время наблюдения он увеличился на 30 % за счет видов, растущих на почве и на комлях деревьев. На ППП появился занесенный в Красную книгу Санкт-Петербурга *Ulota intermedia* Schimp. [Красная..., 2018].

Состав лишайников на обеих ППП изменяется мало (средний ИБД – 73 %), в основном за

счет эпифитных видов, появление или исчезновение которых имеет случайный характер.

Горизонтальная структура обеих ППП за время наблюдения заметно изменилась. На ОЩ-2 сохраняется доминирование чернично-зеленомошной (*Vaccinium myrtillus*–*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.+*Dicranum* spp. Hedw.) группировки, площадь которой выросла почти в 2 раза (с 857 до 1560 м²), в основном за счет практически полного поглощения бруснично-чернично-зеленомошной (*Vaccinium vitis-idaea* L.+*V. myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.) и частично зеленомошной (*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.) и плауново-зеленомошной (*Diphasiastrum complanatum* (L.) Holub – *Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.) группировок. Незадернованная почва зарастает черникой и зелеными мхами. На автомобильной дороге появились группировки пионерной растительности, она постепенно превращается в тропу, но все еще хорошо видна (рис. 1).

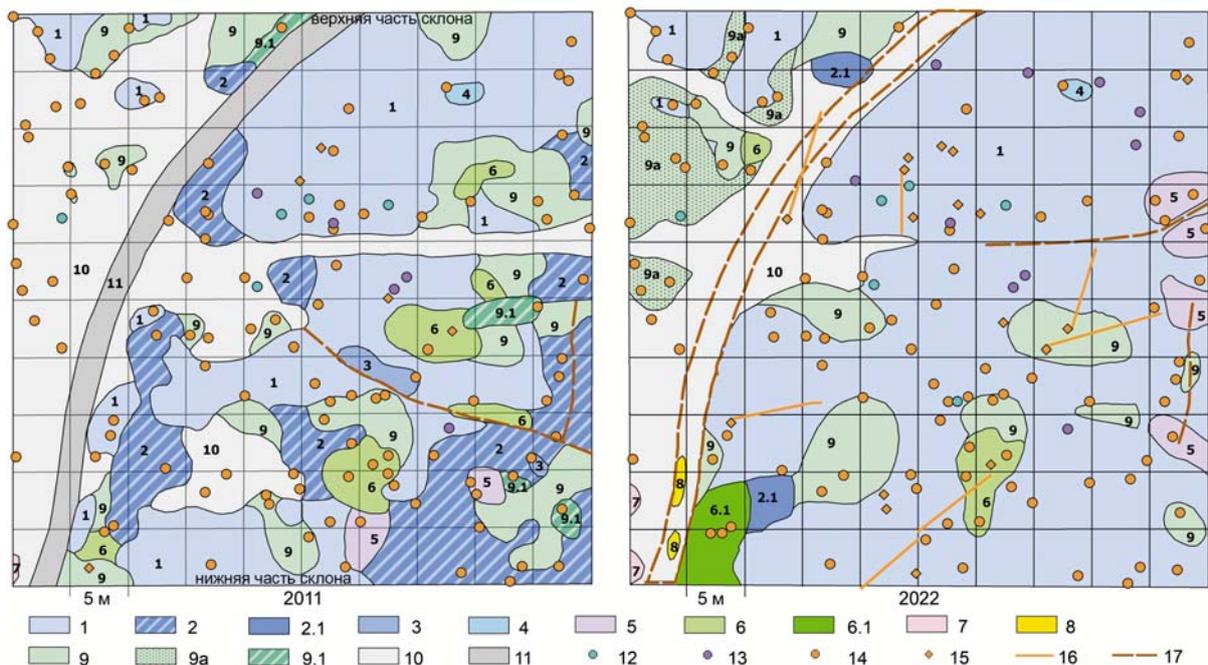


Рис. 1. Горизонтальная структура растительного покрова сосняка кустарничково-зеленомошного (ОЩ-2)

Микрогруппировки/microcenoses: 1 – *Vaccinium myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 2 – *Vaccinium vitis-idaea*+*V. myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 2.1 – *Vaccinium myrtillus*+*V. vitis-idaea*+*Arctostaphylos uva-ursi*+*Calluna vulgaris* (L.) Hull–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 3 – *Vaccinium myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.+*Cetraria islandica* (L.) Ach.+*Cladonia* spp. P. Browne; 4 – *Vaccinium myrtillus*+*V. uliginosum* L.–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 5 – *Vaccinium vitis-idaea*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 6 – *Diphasiastrum complanatum*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 6.1 – *Diphasiastrum complanatum*+*Vaccinium myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 7 – *Arctostaphylos uva-ursi*; 8 – *Agrostis tenuis*+*Poa annua* L.+*Juncus tenuis*; 9 – *Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 9a – *Dicranum scoparium* Hedw. разреженная/sparse; 9.1 – *Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.+*Cetraria islandica*+*Cladonia* spp.; 10 – без растительного покрова/no vegetation cover; 11 – дорога/road. Деревья/trees: 12 – *Betula pendula* Roth, 13 – *Picea abies*, 14 – *Pinus sylvestris*, 15 – *Pinus sylvestris* сухостой/dead wood, 16 – *Pinus sylvestris* валек/fallen logs, 17 – тропы/pathways

Fig. 1. Horizontal structure of vegetation cover in *Pinetum fruticulosum-hylocomiosum* ('Ozero Shchuchye-2' permanent sample plot)

Хотя общее проективное покрытие нижних ярусов за все время наблюдения выросло (с 70 до 83 %), сообщество по-прежнему находится на III стадии рекреационной нарушенности [по: Исаченко и др., 2020].

Аналогичная ситуация сохранения IV стадии рекреационной нарушенности при росте общего проективного покрытия (с 30 до 46 %) наблюдается на ОЩ-3. Частично сменились доминирующие группировки: в 2011 г. это были зеленомошная (*Dicranum* spp.+*Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb.; 37 % всей покрытой растительностью площади), бруснично-зеленомошная (*Vaccinium vitis-idaea*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 30 %) и черничная (*Vaccinium myrtillus*; 14 %) группировки; в 2022 г. наибольшая площадь отмечена у черничной группировки (27 % всей покрытой растительностью площади), примерно

равные территории занимают бруснично-зеленомошная и чернично-зеленомошная (*Vaccinium myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; по 20 % каждая), на сформировавшуюся из зеленомошной группировки долгомошно-зеленомошную (*Polytrichum* spp. Hedw.+*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.) приходится 14 % всей покрытой растительностью площади. Незадернованная почва зарастает черникой, зелеными мхами и злаками. Полностью исчезли кострища; на ППП сохраняется несколько троп (рис. 2).

NMDS-ординации показывают, что статистически значимых изменений в видовом составе и среднем проективном покрытии напочвенных видов за время наблюдения не произошло ни на ОЩ-2 ($R^2 = 0,0487$; $p = 0,23$), ни на ОЩ-3 ($R^2 = 0,056$; $p = 0,853$) (рис. 3 и 4).

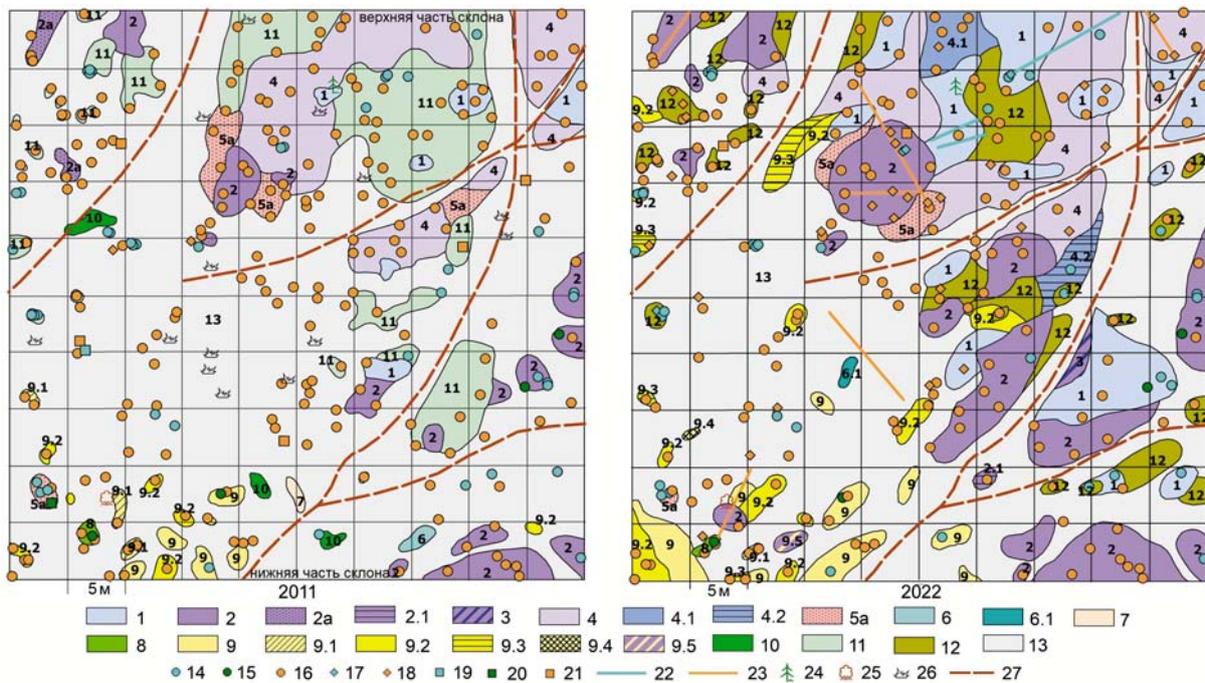


Рис. 2. Горизонтальная структура растительного покрова сосняка кустарничково-зеленомошного с сильно деградированным покровом (ОЩ-3)

Микрогруппировки/microcenoses: 1 – *Vaccinium myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 2 – *Vaccinium myrtillus*; 2a – *Vaccinium myrtillus* разреженная/sparse; 2.1 – *Vaccinium myrtillus*+*Calluna vulgaris*; 3 – *Vaccinium myrtillus*–*Polytrichum* spp.; 4 – *Vaccinium vitis-idaea*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 4.1 – *Vaccinium vitis-idaea*+*V. myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 4.2 – *Vaccinium vitis-idaea*+*Calluna vulgaris*+*Vaccinium myrtillus*–*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 5a – *Vaccinium vitis-idaea* разреженная/sparse; 6 – *Convallaria majalis* L.+*Melampyrum pratense* L.; 6.1 – *Melampyrum pratense*; 7 – *Plantago major* L.; 8 – *Antennaria dioica* (L.) Gaertn.+*Avenella flexuosa* (L.) Drej.+*Rumex acetosella* L.; 9 – *Agrostis tenuis*+*Festuca ovina*+*Avenella flexuosa*; 9.1 – *Avenella flexuosa*; 9.2 – *Festuca ovina*; 9.3 – *Festuca ovina*+*Calluna vulgaris*; 9.4 – *Agrostis tenuis*; 9.5 – *Vaccinium myrtillus*+*Agrostis tenuis*+*Festuca ovina*+*Avenella flexuosa*; 10 – *Poa annua*; 11 – *Dicranum* spp.+*Pohlia nutans*; 12 – *Polytrichum* spp.+*Pleurozium schreberi*+*Dicranum* spp.; 13 – без растительного покрова/no vegetation cover. Деревья/trees: 14 – *Betula pendula*; 15 – *Populus tremula* L.; 16 – *Pinus sylvestris*; 17 – *Betula pendula* сухостой/dead wood; 18 – *Pinus sylvestris* сухостой/dead wood; 19 – *Betula pendula* пень/a stump; 20 – *Populus tremula* пень/a stump; 21 – *Pinus sylvestris* пень/a stump; 22 – *Betula pendula* валеж/fallen logs; 23 – *Pinus sylvestris* валеж/fallen logs. Подрост и подлесок/undergrowth: 24 – *Abies sibirica*; 25 – *Juniperus communis*. 26 – кострища/bonfire sites; 27 – тропы/pathways

Fig. 2. Horizontal structure of vegetation cover in *Pinetum fruticulosum-hylocomiosum* with degraded vegetation cover ('Ozero Shchuchye-3' permanent sample plot)

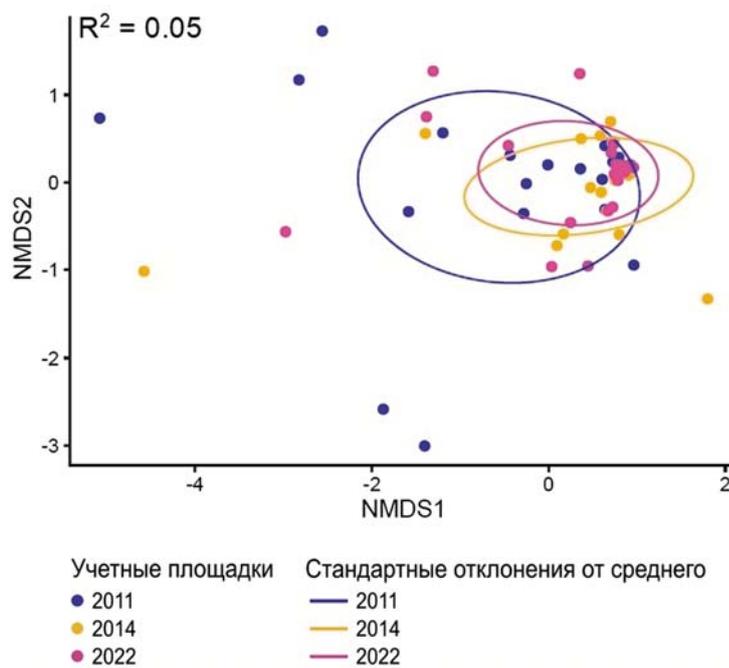


Рис. 3. Ординационная диаграмма напочвенной растительности на метровых площадках в сосняке кустарничково-зеленомошном (ОЦ-2)

Fig. 3. Ordination diagram of ground vegetation in one-square meter sample plots in *Pinetum fruticoso-hylocomiosum* ('Ozero Shchuchye-2' permanent sample plot)

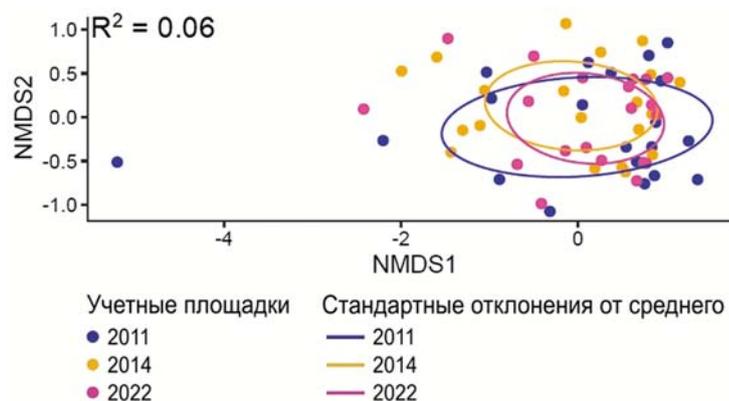


Рис. 4. Ординационная диаграмма напочвенной растительности на метровых площадках в сосняке кустарничково-зеленомошном с сильно деградированным покровом (ОЦ-3)

Fig. 4. Ordination diagram of ground vegetation in one-square meter sample plots in *Pinetum fruticoso-hylocomiosum* with degraded vegetation cover ('Ozero Shchuchye-3' permanent sample plot)

Это соответствует литературным данным, согласно которым для восстановления напочвенного покрова при полном снятии антропогенной нагрузки (чего в исследуемом случае не произошло) без проведения каких-либо мероприятий требуется минимум 10–15 лет [Будрюнас, 1971; Полякова и др., 1981; Larson, Rew, 2022].

Выводы

Создание заказника и связанные с этим ограничения положительно повлияли на исследуемые сообщества. Увеличилось общее биоразнообразие, во флористическом составе стало больше типично лесных видов, среди мохообразных появились виды, занесенные

в Красную книгу Санкт-Петербурга [2018]; выросла численность подлеска. Заметно изменилась горизонтальная структура нижних ярусов сообществ; незадернованная почва постепенно зарастает пионерной растительностью, зелеными мхами и черникой. Все это свидетельствует о происходящем процессе демуляции. Тем не менее отсутствие статистически значимых изменений в видовом составе и среднем проективном покрытии напочвенных видов и то, что исследуемые сообщества остались на тех же стадиях нарушенности, свидетельствует, что 11 лет – недостаточный срок для восстановления растительного покрова в условиях сохраняющейся (хотя и снизившейся) рекреационной нагрузки.

Авторы выражают искреннюю благодарность принимавшим участие в полевых работах и обработке данных сотрудникам кафедры физической географии и ландшафтного планирования Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета Г. А. Исаченко и А. И. Резникову, а также сотрудникам лаборатории лишенологии и бриологии БИН РАН Л. Е. Курбатовой, Э. Г. Гинзбург, Д. Е. Гимельбранту и И. С. Степанчиковой.

Литература

Будрюнас А. Р. Антропогенная дигрессия лесов в густонаселенных районах // Вопросы охраны ботанических объектов. М.: Наука, 1971. С. 48–53.

Вахрушева К. Городские ООПТ в мире: где, как и зачем // Экология и право. 2019. № 75. С. 18–26.

Государственный природный заказник «Озеро Щучье» // ГКУ «Дирекция особо охраняемых природных территорий Санкт-Петербурга» [Электронный ресурс]. URL: https://oopt.spb.ru/protected_area/ozero-schuchje/ (дата обращения: 03.09.2024).

Дыренков С. А. Изменения лесных биогеоценозов под влиянием рекреационных нагрузок и возможности их регулирования // Рекреационное лесопользование в СССР. М.: Наука, 1983. С. 20–34.

Заугольнова Л. Б., Мартыненко В. Б. ОпределиТЕЛЬ типов леса европейской части России [Электронный ресурс]. 2014. URL: <https://cepl.rssi.ru/bio/forest/index.htm> (дата обращения: 22.08.2024).

Исаченко Т. Е., Исаченко Г. А., Озерова С. Д. Оценка рекреационной нарушенности и регулирование рекреационных нагрузок на особо охраняемых природных территориях Санкт-Петербурга // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 65, вып. 1. С. 16–32. doi: 10.21638/spbu07.2020.102

Красная книга Санкт-Петербурга / Отв. ред. Д. В. Гельтман. СПб.: Дитон, 2018. 568 с.

Полякова Г. А., Малышева Т. В., Флеров А. А. Антропогенное влияние на сосновые леса Подмоськвы. М.: Наука, 1981. 144 с.

Природа заказника «Озеро Щучье» / Ред. Е. А. Волкова, Г. А. Исаченко, В. Н. Храмов. СПб., 2017. 188 с.

Реймерс Н. Ф. Природопользование. М.: Мысль, 1990. 637 с.

Рысин Л. П., Рысин С. Л. Урболесоведение. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2012. 240 с.

Савицкая С. Н. О рекреационной деградации пригородных лесов // Ботанический журнал. 1978. Т. 63, № 12. С. 1710–1720.

Смирнов В. Э., Ханина Л. Г., Бобровский М. В. Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны Европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний и статистического анализа // Бюл. МОИП. Отд. биол. 2006. Т. 111, вып. 2. С. 36–47.

Храмов В. Н., Волкова Е. А., Исаченко Г. А., Резников А. И. Методика ведения мониторинга и состав наблюдений природных комплексов на ООПТ Санкт-Петербурга. СПб., 2011. 38 с.

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

Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильсон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы) / Федеральное агентство лесного хозяйства, Междунар. ин-т прикладного системного анализа. 2-е изд., доп. М., 2008. 886 с.

Hodgetts N. G., Söderström L., Blockeel T. L., Caspari S., Ignatov M. S., Konstantinova N. A., Lockhart N., Papp B., Schröck C., Sim-Sim M., Bell D., Bell N. E., Blom H. H., Bruggeman-Nannenga M. A., Brugués M., Enroth J., Flatberg K. I., Garilleti R., Hedenäs L., Holyoak D. T., Hugonnot V., Kariyawasam I., Köckinger H., Kučera J., Lara F., Porley R. D. An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus // J. Bryol. 2020. Vol. 42, no. 1. P. 1–116. doi: 10.1080/03736687.2019.1694329

Koch L. F. Index of biotal dispersity // Ecology. 1957. Vol. 38, no. 1. P. 145–148.

Larson C. D., Rew L. J. Restoration intensity shapes floristic recovery after forest road decommissioning // J. Environ. Manag. 2022. Vol. 391. Art. 115729. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115729

Oksanen J., Blanchet F. G., Kindt R., Legendre P., O'Hara R. G., Simpson G., Solymos P., Stevens H., Wagner H. Multivariate analysis of ecological communities in R: vegan tutorial. 2013. R package version 1.7.

Westberg M., Moberg R., Myrdal M., Nordin A., Ekman S. Santesson's checklist of Fennoscandian lichen-forming and lichenicolous fungi. Uppsala University: Museum of Evolution, 2021. 933 p.

References

Budryunas A. R. Anthropogenic digression in densely populated regions. *Voprosy okhrany botanicheskikh ob"ektov = Issues of botanical objects protection*. Moscow: Nauka; 1971. P. 48–53. (In Russ.)

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

Dyrenkov S. A. Changes in forest biogeocenoses under the influence of recreational loads and possibilities of their regulation. *Rekreatsionnoe lesopol'zovanie v SSSR = Recreational use of forests in the USSR*. Moscow: Nauka; 1983. P. 20–34. (In Russ.)

Gel'tman D. V. (ed.). The Red Data Book of Saint Petersburg. St. Petersburg: Diton; 2018. 568 p. (In Russ.)

Hodgetts N. G., Söderström L., Blockeel T. L., Caspari S., Ignatov M. S., Konstantinova N. A., Lockhart N., Papp B., Schröck C., Sim-Sim M., Bell D., Bell N. E., Blom H. H., Bruggeman-Nannenga M. A., Brugués M., Enroth J., Flatberg K. I., Garilleti R., Hedenäs L., Holyoak D. T., Hugonnot V., Kariyawasam I., Köckinger H., Kučera J., Lara F., Porley R. D. An annotated check list of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus. *J. Bryol.* 2020;42(1):1–116. doi: 10.1080/03736687.2019.1694329

Isachenko T. E., Isachenko G. A., Ozerova S. D. Evaluation of recreational disturbance and the regulation of loads on specially protected natural areas in St. Petersburg. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle = Vestnik of St. Petersburg University. Earth Sciences.* 2020;65(1):16–32. (In Russ.). doi: 10.21638/spbu07.2020.102

Khrantsov V. N., Volkova E. A., Isachenko G. A., Reznikov A. I. Monitoring methodology and observation of natural complexes composition on specially protected natural areas in St. Petersburg. St. Petersburg; 2011. 38 p. (In Russ.)

Koch L. F. Index of biotal dispersity. *Ecology.* 1957;38(1):145–148.

Larson C. D., Rew L. J. Restoration intensity shapes floristic recovery after forest road decommissioning. *J. Environ. Manag.* 2022;391:115729. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115729

Oksanen J., Blanchet F. G., Kindt R., Legendre P., O'Hara R. G., Simpson G., Solymos P., Stevens H., Wagner H. Multivariate analysis of ecological communities in R: vegan tutorial. 2013. R package version 1.7.

Polyakova G. A., Malysheva T. V., Flerov A. A. Anthropogenic impact on pine forests in the Moscow region. Moscow: Nauka; 1981. 144 p. (In Russ.)

Reymers N. F. Environmental management. Moscow: Mysl'; 1990. 636 p. (In Russ.)

Rysin L. P., Rysin S. L. Urban forestry. Moscow: KMK; 2012. 240 p. (In Russ.)

Savitskaya S. N. On recreational degradation of suburban forests. *Bot. Zhurn.* 1978;63(12):1710–1720. (In Russ.)

Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Nilsson S., Bului Yu. I. Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials). 2nd ed., enl. Moscow; 2008. 886 p. (In Russ.)

Smirnov V. E., Khanina L. G., Bobrovskii M. V. Validation of the ecological-coenotical groups of vascular plant species for European Russian forests on the basis of ecological indicator values, vegetation releves and statistical analysis. *Byul. MOIP. Otd. biol. = Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological Series.* 2006;111(2):36–47. (In Russ.)

State Nature Reserve 'Ozero Shchuchye'. *GKU «Direktsiya osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii Sankt-Peterburga» = State institution 'Directorate of the specially protected natural areas in St. Petersburg'*. (In Russ.). URL: https://oopt.spb.ru/protected_area/ozero-schuchje/ (accessed: 03.09.2024).

Vakhrusheva K. Urban protected areas in the world: where, how and why. *Ekologiya i pravo = Ecology and Law.* 2019;75:18–26. (In Russ.)

Volkova E.A., Isachenko G. A., Khrantsov V. N. (eds.). Nature of the reserve 'Ozero Shchuchye'. St. Petersburg; 2017. 188 p. (In Russ.)

Westberg M., Moberg R., Myrdal M., Nordin A., Ekman S. Santesson's checklist of Fennoscandian lichen-forming and lichenicolous fungi. Uppsala University: Museum of Evolution; 2021. 933 p.

Zaugol'nova L. B., Martynenko V. B. A field guide of forest types of European Russia. 2014. (In Russ.). URL: <https://cepl.rssi.ru/bio/forest/index.htm> (accessed: 22.08.2024).

Поступила в редакцию / received: 30.10.2024; принята к публикации / accepted: 04.12.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Добронравина Валентина Николаевна

аспирант, старший лаборант лаборатории географии и картографии растительности

e-mail: dobronravina.v@yandex.ru

Волкова Елена Анатольевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и картографии растительности

e-mail: EVolkova@binran.ru

Храмцов Владимир Николаевич

канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории географии и картографии растительности

e-mail: VKhrantsov@binran.ru

CONTRIBUTORS:

Dobronravina, Valentina

Doctoral Student, Senior Laboratory Technician

Volkova, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Khrantsov, Vladimir

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

УДК 57.033; 57.043

СЕРДЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ МИДИЙ *MYTILUS EDULIS* L. РАЗНЫХ ВОЗРАСТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

И. Н. Бахмет^{1*}, Д. А. Екимов²

¹ Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *igor.bakhmet@gmail.com

² Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

В работе впервые оценен адаптивный потенциал мидий *Mytilus edulis* L. разного возраста к изменению температуры с применением метода регистрации сердечной активности животных. Показано, что мидии с размером раковины 40–50 мм (возраст 6+) имеют возможность адаптироваться к более высоким температурам по сравнению с молодыми и более возрастными моллюсками. Дисперсия показателей частоты сердечных сокращений (ЧСС) при достижении критических температур падает в размерном ряду мидий от 10 до 70 мм. Степень падения ЧСС при критических температурах была более выраженной у молодых (2+ – 5+) и старых (7+ – 9+) животных по сравнению с 5–6-летними моллюсками. Результаты проведенной работы позволяют предположить, что наибольшей возможностью адаптации к изменению температуры обладают именно вышеуказанные мидии. Кроме того, экспериментально доказана адекватность использования методики дистантной регистрации сердечной ритмики моллюсков при оценке адаптивного потенциала моллюсков к температурным изменениям.

Ключевые слова: сердечная активность; температурное воздействие; возраст; ЧСС; мидия

Для цитирования: Бахмет И. Н., Екимов Д. А. Сердечная активность мидий *Mytilus edulis* L. разных возрастов при изменении температуры // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 51–59. doi: 10.17076/eco1987

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0007).

I. N. Bakhmet^{1*}, D. A. Ekimov². CARDIAC ACTIVITY OF *MYTILUS EDULIS* L. OF DIFFERENT AGES UNDER TEMPERATURE CHANGES

¹ Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *igor.bakhmet@gmail.com

² Department for Multidisciplinary Research, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

In our study, the adaptive potential of *Mytilus edulis* L. mussels of different ages under temperature changes was for the first time evaluated using the method of remotely

recording animal cardiac activity. It showed that mussels with a shell size of 40–50 mm (age 6+) had the ability to adapt to higher temperatures compared to younger and older mollusks. The variance of heart rate indicators declined when reaching critical temperatures along the mussel size gradient from 10 to 70 mm. The heart rate drop at critical temperatures was more pronounced in young (2+ – 5+) and old animals (7+ – 9+) compared to 5–6-year-olds. Our results suggest that these mussels are the most adaptable to temperature changes. In addition, the adequacy of the technique of remotely controlling the cardiac rhythm in mollusks for assessing their temperature adaptation potential has been experimentally proven.

Keywords: cardiac activity; temperature impact; age; heart rate; blue mussel

For citation: Bakhmet I. N., Ekimov D. A. Cardiac activity of *Mytilus edulis* L. of different ages under temperature changes. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 51–59. doi: 10.17076/eco1987

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (FMEN-2022-0007).

Введение

Общеизвестно, что температура для экотермных организмов, и в частности для моллюсков, является одним из ключевых экологических факторов, что и вызывает повышенный интерес к исследованию влияния температурных изменений на организм пойкилотермных животных. В этой связи особое внимание вызывают литоральные виды, которые подвержены чрезвычайной изменчивости абиотических факторов в связи с отливно-приливным циклом. При этом варьирование, к примеру, температуры сильно зависит от региона исследования. В тропиках и субтропиках изменения минимальны, тогда как в умеренных широтах они более выражены. На этом фоне резко выделяется Белое море с колебанием температуры поверхностных вод от $-1,5$ °C зимой до $20,2$ °C летом [Бабков и др., 1985]. Более того, на литорали в отлив температура, к примеру, мидий может варьировать от -9 ... -12 °C зимой до $+40$ °C летом (собственные наблюдения). С учетом возможного глобального потепления климата в будущем температурные сдвиги могут еще более возрасти и, соответственно, приводить к нарушению оптимальных условий существования моллюсков и к их смертности, особенно в высоких широтах [Somero, 2010; Masanja et al., 2023]. Прежде всего это будет касаться прибрежной зоны, и в частности, именно литорали. Известно, что в данном биотопе мидии, как правило, являются видом-эдикатором, то есть видом, определяющим структуру бентосного сообщества благодаря своей ведущей роли в структуре и функционировании экосистемы. Это определяет важность исследования реакций именно указанного вида на изменение температуры.

Исследования влияния температуры на моллюсков выполняются достаточно давно. При этом в основном использовались следующие методы: определение уровня потребления кислорода [Lesser, Kruse, 2004], измерение скорости фильтрации [Pack et al., 2020] и биохимические подходы [Jankowsky, 1973; Sokolova et al., 2012]. На основе проведенных экспериментов установлено, что эти показатели не всегда напрямую зависят от температуры, то есть не полностью подчиняются закону Вант-Гоффа – Аррениуса. Кроме того, все вышеупомянутые методы связаны с серьезным стрессовым воздействием, особенно в случае применения биохимических методик. Наряду с этим еще в 1953 году проводилась оценка сердечной активности беспозвоночных в экспериментах по изучению температурной акклимации [Segal et al., 1953]. Внимание к сердечной функции моллюсков связано с гипотезой, что работа сердца особенно важна для термотолерантности, а именно сердечная активность, и в особенности частота сердечных сокращений (ЧСС), – лимитирующий фактор, своего рода «weaklink» в физиологических процессах при акклимации экотермов к разным температурам [Somero, 2005; Eliason et al., 2011]. Однако применение данной методики было затруднено из-за различных артефактов, вызванных имплантацией электродов и/или другими повреждающими воздействиями [Segal, 1961; Wayne, 1973]. В последние десятилетия этот недостаток преодолен благодаря использованию новой методики неинвазивной дистантной регистрации ЧСС [Depledge, Andersen, 1990; Marshall, McQuaid, 1993; Xing et al., 2019; Eymann et al., 2020]. Исследования показали наличие достоверной корреляции между изменениями сердечной ритмики морских беспозвоночных

и варьированием различных природных факторов [Marshall, McQuaid, 1993; Santini et al., 2000; Bakhmet et al., 2005]. Установленная в дальнейшем положительная корреляция между ЧСС и уровнем потребления кислорода морских моллюсков показала, что сердечная активность отражает относительный уровень их метаболизма [Marshall, McQuaid, 1992; Bakhmet, 2017].

В связи с вышесказанным было решено провести эксперименты по исследованию сердечной активности мидий при изменении температуры воды. При этом одной из основных целей работы определялось выявление различий в реакции на температурное воздействие мидий разных возрастов.

Материалы и методы

Сбор и содержание моллюсков

Работа выполнена в апреле 2022 года на Беломорской биологической станции им. О. А. Скарлато Зоологического института РАН. Мидии собирались вручную в бухте Круглой Чупинской губы Кандалакшского залива Белого моря с установок для культивирования моллюсков (глубина 2 м) при температуре воды $-1,2$ °С. После сбора у моллюсков была измерена длина раковины и определен возраст по кольцам зимней остановки роста раковины. Перед началом наблюдений животных в течение 3 суток акклимировали к лабораторным условиям. Моллюсков содержали в 10-литровых аквариумах из оргстекла с аэрируемой морской водой природной солености 25 ‰ при постоянном освещении и температуре 0 °С. Ежедневно проводилась частичная (половина объема) смена воды той же температуры. Поскольку питание, по-видимому, оказывает специфическое динамическое действие на сердечную активность животных, кормление мидий не производилось.

За сутки до начала эксперимента к раковинам тестируемых животных приклеивали оптические сенсоры CNY70 (см. ниже) и помещали по 15 особей в аквариумы объемом 15 литров с постоянной аэрацией. Всего в эксперименте использовано 43 мидии размерами от 20 до 70 мм и возрастом соответственно от 2+ до 9+ лет.

Регистрация сердечного ритма и обработка полученных данных

Регистрацию ЧСС проводили непрерывно на протяжении всего эксперимента. Запись сердечного ритма осуществлялась при помощи методики неинвазивной дистантной регистрации

изменения объема сердечной мышцы (плетизмограмма), основанной на излучении инфракрасного света в область расположения сердца и приема измененных отраженных от сокращающегося сердца лучей [Depledge, Andersen, 1990]. Полученный отраженный сигнал был усилен и отфильтрован по методу, разработанному ранее [Depledge, Andersen, 1990]. Затем данные были оцифрованы контроллером Arduino, переданы на компьютер через USB-порт и сохранены в текстовом файле (расширение .txt). Конечный файл содержал значения сигналов, лежащие в диапазоне от 0 до 1023 относительных единиц с частотой дискретизации 20 Гц. Вычисление последовательности RR-интервалов (временного интервала между двумя сердечными сокращениями) осуществлялось с помощью оригинального алгоритма обработки данных плетизмограммы [Bakhmet, Ekimov, 2021]. На графиках приведены средние арифметические значения числа сокращений сердца мидий в минуту. В последнее время в качестве индикатора переносимости организмом тепловых воздействий стали использовать температуру по так называемой точке перелома Аррениуса (ТПА) в сердечной деятельности [Stillman, Somero, 1996].

Проведение эксперимента

Аквариум с мидиями одного размера (возраста) помещали в программируемый термостат ERSTEVAKTSM 2A130W при температуре 0 °С. Через 1 час температуру начинали повышать со скоростью 1 °С в час вплоть до температуры 26 °С с последующим понижением с той же скоростью.

Результаты и обсуждение

Прежде всего отметим, что даже при отрицательных температурах сердцебиения не прекращались во всех возрастных группах мидий. Зависимость сердечной ритмики от температуры описывалась экспоненциальными уравнениями при подъеме температуры и линейными уравнениями при понижении температуры с высоким уровнем достоверности ($p < 0,001$). ЧСС моллюсков закономерно (см. ниже) возрастала с ростом температуры и падала при понижении температуры вне зависимости от возраста моллюсков (рис. 1, 2). При этом выраженных различий в коэффициентах уравнений в случае разных возрастных классов не отмечено (табл. 1). Также не выявлено различий между ЧСС моллюсков разного размера (возраста) (рис. 1, 2), в связи с чем не удалось найти зависимость ЧСС от размера.

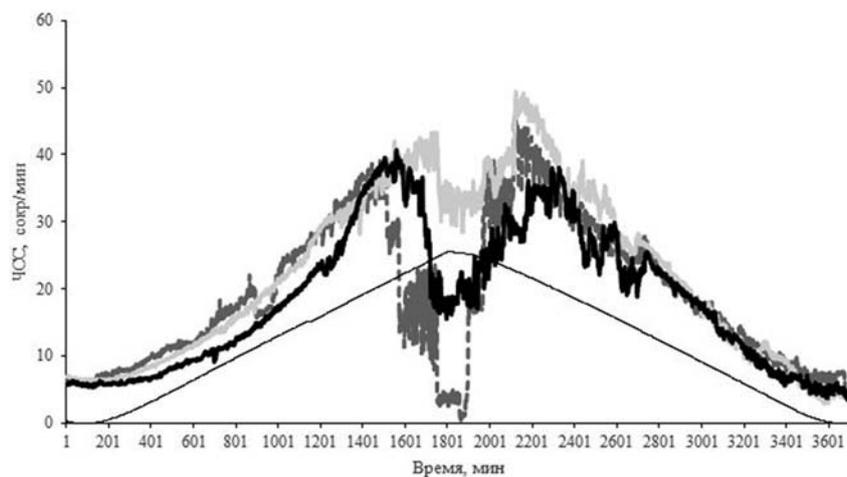


Рис. 1. Изменение ЧСС мидий разного размера (возраста) при подъеме и падении температуры (тонкая черная линия – $t^{\circ}\text{C}$; темно-серая линия – мидии с длиной раковины от 10 до 20 мм; светло-серая линия – мидии с длиной раковины от 40 до 50 мм; черная линия – мидии с длиной раковины от 60 до 70 мм)

Fig. 1. Change in heart rate of mussels of different sizes (age) under rising and falling of temperature (thin black line – $t^{\circ}\text{C}$; dark grey line – mussels with a shell length from 10 to 20 mm; light grey line – mussels with a shell length from 40 to 50 mm; black line – mussels with a shell length from 60 to 70 mm)

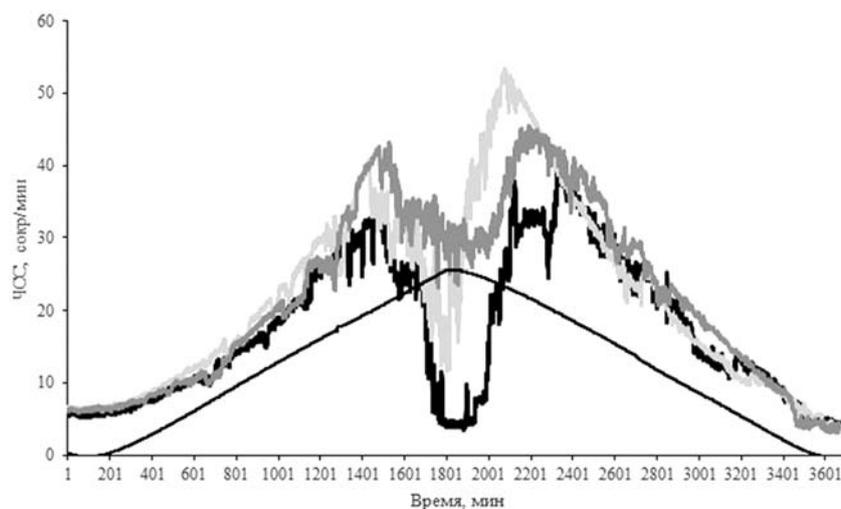


Рис. 2. Изменение ЧСС мидий разного размера (возраста) при подъеме и падении температуры (тонкая черная линия – $t^{\circ}\text{C}$; темно-серая линия – мидии с длиной раковины от 20 до 30 мм; светло-серая линия – мидии с длиной раковины от 30 до 40 мм; черная линия – мидии с длиной раковины от 50 до 60 мм)

Fig. 2. Change in heart rate of mussels of different sizes (age) under rising and falling of temperature (thin black line – $t^{\circ}\text{C}$; dark grey line – mussels with a shell length from 20 to 30 mm; light grey line – mussels with a shell length from 30 to 40 mm; black line – mussels with a shell length from 50 to 60 mm)

В то же время именно показатель размера (возраст) оказал существенное влияние на значения критических температур (T_{cr}) (табл. 2). T_{cr} увеличивалась начиная с мидий возраста 2+ – 3+ вплоть до моллюсков возраста +5 – 6+ с последующим снижением у более старых животных. Аналогичная картина наблюдалась и в случае температуры, при которой сердечная активность восстанавливалась, за исключением мидий 3+ – 4+. Еще один показатель – количество «срывов» ЧСС до полной остановки сокращений – также был наивысшим у самых молодых и старых моллюсков и наименьшим у животных 6–7 лет. Более того, степень падения (средняя минимальная ЧСС во время падения сердечной активности при высоких температурах) также была более выраженной у 6–7-летних мидий (рис. 3). Закономерностей в изменении амплитуды сигнала обнаружить не удалось.

Таблица 1. Зависимость ЧСС от температуры при нагревании

Table 1. Relationship between mussels HR and temperature under heating

Длина раковины, мм Shell length, mm	Возраст Age	a	b	r
10–20	1+ – 2+	5,88	0,09	0,98
20–30	2+ – 3+	5,77	0,09	0,99
30–40	4+ – 5+	6,63	0,09	0,97
40–50	5+ – 6+	5,40	0,10	0,97
50–60	7+ – 8+	6,26	0,09	0,98
60–70	8+ – 9+	5,46	0,09	0,96

Примечание. a, b – коэффициенты в уравнении ЧСС = $a \cdot e^{bt}$; t – температура; r – коэффициент корреляции.

Note. a, b – coefficients in the equation $HR = a \cdot e^{bt}$; t – temperature; r – correlation coefficient.

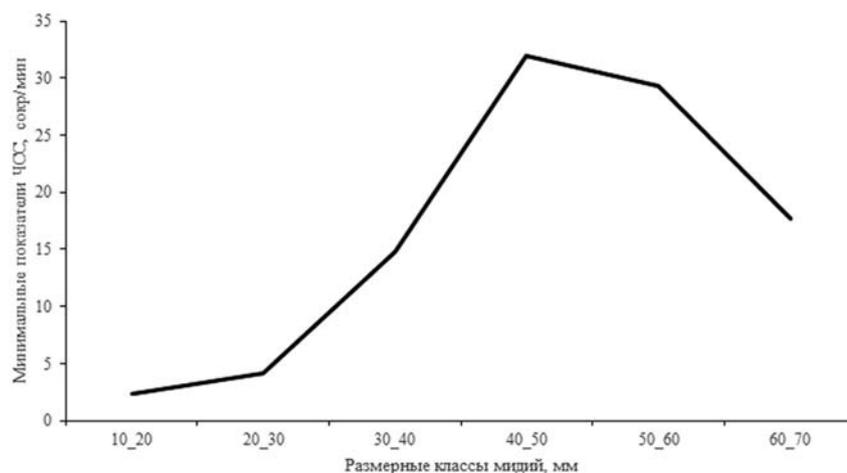


Рис. 3. Минимальные показатели ЧСС во время падения сердечной активности, связанные с температурами выше критических

Fig. 3. Minimum heart rate during a drop in cardiac activity associated with temperatures above critical ones

Таблица 2. Критические температуры, °C

Table 2. Critical temperatures, °C

Мидии, мм Mussels, mm	X	Y	Z
20–30	20,5	24,7	19,6
30–40	19,7	25,4	23,4
40–50	24,7	24,0	22,9
50–60	21,6	23,2	18,5
60–70	21,7	24,9	19,7

Примечание. X – критическая температура, при которой происходит падение ЧСС; Y – температура, при которой начинается восстановление сердечной активности; Z – температура полного восстановления (подъема) ЧСС.

Note. X is the critical temperature at which the heart rate drops; Y is the temperature at which the restoration of cardiac activity begins; Z is the temperature of complete HR recovery (increase).

При расчете дисперсии ЧСС выяснилось, что разброс значений ЧСС резко возрастал при критических температурах. Обращает на себя внимание тот факт, что рост дисперсии начинался на несколько градусов ниже, чем критические температуры, что свидетельствует об индивидуальной вариабельности. Максимальные значения дисперсии понижались при увеличении размера (возраста) моллюсков от 1388 у мидий возраста 2+ – 3+ до 570 у животных возраста 8+ – 9+ (табл. 3).

Таблица 3. Максимальные значения дисперсии показателей ЧСС в разных возрастных группах мидий

Table 3. Maximum values of the variance of heart rate indicators in different age classes of blue mussels

Возраст моллюсков Mussels age	1+ – 2+	2+ – 3+	4+ – 5+	5+ – 6+	7+ – 8+	8+ – 9+
Дисперсия ЧСС, у.е. HR variance	1388	750	750	522	662	570

Коэффициент Q10 варьировал от 1,88 до 3,06. При этом были отмечены определенные изменения данного коэффициента. Во-первых, у мидий с размерностью от 10 до 50 мм Q10 плавно понижался с ростом температуры, тогда как у моллюсков от 50 до 70 мм наблюдалась обратная тенденция (табл. 4). В случае повышения температуры от 15 до 20 °C Q10 резко возрастал от 1,88 (наименьшее значение) у мидий размером 10–20 мм до 3,06 у моллюсков с длиной раковины 50–70 мм. В случае понижения температуры коэффициент повышался по ходу понижения температуры с достижением аномально высоких значений при переходе от 5 до 0 °C (табл. 5).

Таблица 4. Коэффициент Q10 при повышении температуры среды для мидий разных размерных групп
Table 4. Coefficients Q10 under heating of ambient water for mussels of different size classes

Температура, °C Temperature, °C				
Размер моллюсков, мм Mussels size, mm	0–5	5–10	10–15	15–20
10–20	2,77	2,33	2,20	1,88
20–30	2,73	2,33	2,20	2,17
30–40	2,60	2,17	2,72	2,06
40–50	2,57	2,42	2,37	2,01
50–60	2,26	2,53	2,19	3,06
60–70	2,08	2,22	2,67	3,06

Таблица 5. Коэффициент Q10 при понижении температуры для мидий разных размерных групп
Table 5. Coefficients Q10 under cooling of ambient water for mussels of different size classes

Температура, °C Temperature, °C				
Размер моллюсков, мм Mussels size, mm	20–15	15–10	10–5	5–0
10–20	1,92	1,69	2,47	3,21
20–30	1,50	1,93	2,47	5,80
30–40	2,58	2,03	2,93	3,47
40–50	2,07	1,78	4,16	6,45
50–60	2,13	1,74	2,74	8,73
60–70	2,42	1,36	3,35	4,64

Особые условия Белого моря (отрицательные температуры воды в зимнее время) послужили причиной пошаговой адаптации моллюсков, в результате чего при нулевых температурах сердечная активность остается на достаточно высоком уровне (4–9 сок/мин).

К примеру, у мидий атлантического побережья в аналогичных условиях сердцебиения прекращались [Braby, Somero, 2006]. Верхние критические температуры для мидий были определены ранее в пределах 30–31 °C [Widdows, 1973; Zittier et al., 2015], тогда как в нашем случае этот показатель не превышал 24,7 °C. Более того, в работе [Zittier et al., 2015] обнаружена так называемая «*rejus temperature*», а именно, после 25 °C ЧСС выходила на плато с резким понижением при 30 °C. В нашей работе этот эффект не наблюдался в связи, по-видимому, с тем, что мы использовали беломорских мидий, тогда как в вышеуказанных исследованиях авторы изучали моллюсков восточного побережья Атлантики, где температура не падает ниже +5 °C. В то же время температура, при которой начинался «*rejus temperature*», полностью совпадает с максимальной критической температурой, определенной в нашей работе. Таким образом, можно полагать, что реальная критическая температура для мидий составляет именно 25 °C.

Еще один интересный момент нашей работы заключается в отсутствии эффекта тканевой компенсации [Jankowsky, 1973], то есть даже при комфортных условиях ЧСС не выходила на плато, что было отмечено, к примеру, для устрицы [Pack et al., 2020]. Причина данного эффекта заключается, возможно, в слишком быстром подъеме температуры. К примеру, в работе [Widdows, Bayne, 1971] показано, что для выхода на плато уровня метаболизма при изменении температуры необходимо от 9 до 14 суток. С другой стороны, даже в природных условиях ЧСС мидий линейно возрастала с увеличением и/или уменьшением температуры [Bakhtmet et al., 2018]. Возможно, это связано с тем, что эффект тканевой компенсации был обнаружен с применением лабораторных методов и, соответственно, со стрессовым эффектом. В нашем же случае воздействие на организм моллюсков ограничивалось только хэндлингом при наклеивании датчиков. Вследствие этого, по-видимому, коэффициент Q10 не был равен 1 ни в одном из рассмотренных нами температурных диапазонов и ни в одной возрастной группе мидий.

Рассмотрим более подробно изменение температурного коэффициента. Известно, что Q10, рассчитанный для всех моллюсков, падает в ряду температур 5–10–15–20–25 °C и соответственно составляет 2,28–2,21–2,15–2,07 [Ивлева, 1981]. Наши данные демонстрируют аналогичную динамику. В то же время у мидий с размерами 50–70 мм эта закономерность нарушается. Причина, на наш взгляд, заключается в том, что именно у моллюсков таких раз-

меров начинается процесс старения [Sukhotin et al., 2003]. Таким образом, именно с возраста 7 лет у мидий начинается процесс снижения терморезистентности. Это предположение подтверждается результатами работы [Sukhotin et al., 2003], где утверждается, что 6 лет – это средний возраст для моллюсков данного вида на основе резистентности к пониженной солености у мидий разных возрастов. Кроме того, предположение о срыве адаптации высказывал еще Jankowsky [1973]. При этом более всего снижение сопротивляемости к повышению температуры у молодых и старых мидий проявляется в диапазоне от 15 до 20 °С, когда в первом случае Q10 падает ниже 2 (недостаточно энергетика) и во втором случае Q10 возрастает более 3 (излишние затраты). Аномально же высокие показатели коэффициента Q10 при понижении температуры от 5 до 0 °С могут свидетельствовать о недостаточном времени экспозиции для акклимации к низким температурам, то есть процесс адаптации не был закончен.

Еще одним подтверждением начала старения после 6 лет у мидий являются Tcr, так как именно для мидий с размером 40–50 мм были отмечены самые высокие значения этого показателя. Более низкие значения Tcr у молодых моллюсков, возможно, свидетельствуют о не до конца развитом адаптивном потенциале к изменяющимся факторам среды. Об этом свидетельствуют и самые высокие показатели дисперсии ЧСС в этой возрастной группе мидий.

Заключение

В настоящем исследовании при изучении реакции мидий разных возрастов на изменение температуры воды подтверждены ранее высказанные предположения других авторов о процессах старения, которые у данного вида моллюска Белого моря начинаются с 6-летнего возраста [Sukhotin et al., 2003]. С экологической точки зрения и учитывая возможные процессы глобального потепления климата, можно сказать, что 5–6-летние мидии обладают достаточным адаптивным потенциалом, чтобы выдержать довольно серьезные температурные изменения климата. Наконец, применение методики неинвазивной регистрации сердечной активности моллюсков еще раз показало адекватность использования данного метода для оценки относительного уровня метаболизма животных при температурном воздействии.

Хотелось бы выразить глубокую признательность сотрудникам Беломорской биологической станции Зоологического института РАН

за неоценимую помощь при постановке эксперимента, а также сотруднику Лаборатории паразитологии ЗИН РАН Ивану Андреевичу Левакину.

Литература

Бабков А. И., Кулаковский Э. Е., Кунин Б. Л. Гидрологический режим некоторых районов губы Чупа Белого моря в связи с их использованием для марикультуры мидий // Экологические исследования перспективных объектов марикультуры в Белом море: Сб. науч. тр. Л.: ЗИН, 1985. С. 4–8.

Ивлева И. В. Температура среды и скорость энергетического обмена у водных животных. Киев: Наукова думка, 1981. 232 с.

Bakhmet I. N., Berger V. Ja., Khalaman V. V. The effect of salinity changes on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 2005. Vol. 318, iss. 2. P. 121–126. doi: 10.1016/j.jembe.2004.11.023

Bakhmet I. N. Cardiac activity and oxygen consumption of blue mussels (*Mytilus edulis*) from the White Sea in relation to body mass, ambient temperature and food availability // Polar Biol. 2017. Vol. 40. P. 1959–1964. doi: 10.1007/s00300-017-2111-6

Bakhmet I., Ekimov D. Application of a novel computer-aided system to monitor cardiac activity in a mussel undergoing starfish predation // Biol. Bull. 2021. Vol. 240, no. 3. P. 200–204. doi: 10.1086/714361

Bakhmet I. N., Sazhin A., Maximovich N., Ekimov D. In situ long-term monitoring of cardiac activity of two bivalve species from the White Sea, the blue mussel *Mytilus edulis* and horse mussel *Modiolus modiolus* // J. Mar. Biol. Assoc. UK. 2018. Vol. 99, iss. 4. P. 833–840. doi: 10.1017/S0025315418000681

Bayne B. The responses of three species of bivalve mollusc to declining oxygen tension at reduced salinity // Comp. Biochem. Physiol. A. 1973. Vol. 45(3). P. 793–806. doi: 10.1016/0300-9629(73)90082-0

Braby C. E., Somero G. N. Following the heart: temperature and salinity effects on heart rate in native and invasive species of blue mussels (genus *Mytilus*) // J. Exp. Biol. 2006. Vol. 209. P. 2554–2566. doi: 10.1242/jeb.02259

Depledge M. H., Andersen B. B. A computer-aided physiological monitoring system for continuous, long-term recording of cardiac activity in selected invertebrates // Comp. Biochem. Physiol. 1990. Vol. 96. P. 474–477. doi: 10.1016/0300-9629(90)90664-E

Eliason E. J., Clark T. D., Hague M. J., Hanson L. M., Gallagher Z. S., Jeffries K. M., Gale M. K., Patterson D. A., Hinch S. G., Farrell A. P. Differences in thermal tolerance among sockeye salmon populations // Science. 2011. Vol. 332. P. 109–112. doi: 10.1126/science.1199158

Eymann C., Götze S., Bock C., Guderley H., Knoll A. H., Lannig G., Sokolova I. M., Aberhan M., Pörtner H.-O. Thermal performance of the European flat oyster, *Ostrea edulis* (Linnaeus, 1758) – explaining ecological findings under climate change // Mar. Biol. 2020. Vol. 167. Art. 17. doi: 10.1007/s00227-019-3620-3

Jankowsky H.-D.I. Body temperature and external temperature // Precht H., Christophersen J., Hensel H.,

Larcher W. Temperature and Life. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1973. P. 293–301.

Lesser M. P., Kruse V. A. Seasonal temperature compensation in the horse mussel, *Modiolus modiolus*: metabolic enzymes, oxidative stress and heat shock proteins // *Comp. Biochem. Physiol. A*. 2004. Vol. 137. P. 495–504. doi: 10.1016/j.cbpb.2003.10.022

Marshall D. J., McQuaid C. D. Effects of hypoxia and hyposalinity on the heart beat of the intertidal limpets *Patella granularis* (Prosobranchia) and *Siphonaria capensis* (Pulmonata) // *Comp. Biochem. Physiol. A*. 1993. Vol. 106. P. 65–68. doi: 10.1016/0300-9629(93)90040-B

Marshall D. J., McQuaid C. D. Relationship between heart rate and oxygen consumption in the intertidal limpets *Patella granularis* and *Siphonaria oculus* // *Comp. Biochem. Physiol. A*. 1992. Vol. 103. P. 297–300. doi: 10.1016/0300-9629(92)90583-C

Masanja F., Yang K., Xu Y., He G., Liu X., Xu X., Xiaoyan J., Xin L., Mkuye R., Deng Y., Zhao L. Impacts of marine heat extremes on bivalves // *Front. in Mar. Sci.* 2023. Vol. 10. Art. 1159261. doi: 10.3389/fmars.2023.1159261

Pack K. E., Rius M., Mieszkowska N. Long-term environmental tolerance of the non-indigenous Pacific oyster to expected contemporary climate change conditions // *Mar. Environ. Res.* 2020. Vol. 164. Art. 105226. doi: 10.1016/j.marenvres.2020.105226

Santini G., Williams G. A., Chelazzi G. Assessment of factors affecting heart rate of the limpet *Patella vulgata* on the natural shore // *Mar. Biol.* 2000. Vol. 137(2). P. 291–296. doi: 10.1007/s002270000339

Segal E. Acclimation in mollusks // *Amer. Zoologist*. 1961. Vol. 1(2). P. 235–244.

Segal E., Pamparathi K. R., James T. W. Rate of activity as a function of intertidal height within populations of some littoral molluscs // *Nature*. 1953. Vol. 172. P. 1108–1109. doi: 10.1038/1721108b0

Sokolova I. M., Frederich M., Bagwe R., Lannig G., Sukhotin A. A. Energy homeostasis as an integrative tool for assessing limits of environmental stress tolerance in aquatic invertebrates // *Mar. Environ. Res.* 2012. Vol. 79. P. 1–15. doi: 10.1016/j.marenvres.2012.04.003

Somero G. N. Linking biogeography to physiology: evolutionary and acclimatory adjustments of thermal limits // *Front Zool.* 2005. Vol. 2. Art. 1. doi: 10.1186/1742-9994-2-1

Somero G. N. The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers’ // *J. Exp. Biol.* 2010. Vol. 213. P. 912–920. doi:10.1242/jeb.037473

Stillman J., Somero G. Adaptation to temperature stress and aerial exposure in congeneric species of intertidal porcelain crabs (genus *Petrolisthes*): correlation of physiology, biochemistry and morphology with vertical distribution // *J. Exp. Biol.* 1996. Vol. 199. P. 1845–1855. doi: 10.1242/jeb.199.8.1845

Sukhotin A. A., Lajus D. L., Lesin P. A. Influence of age and size on pumping activity and stress resistance in the marine bivalve *Mytilus edulis* L. // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2003. Vol. 284(1-2). P. 129–144. doi: 10.1016/S0022-0981(02)00497-5

Widdows J. Effect of temperature and food on the heart beat, ventilation rate and oxygen uptake of *Myti-*

lus edulis // *Mar. Biol.* 1973. Vol. 20. P. 269–276. doi: 10.1007/BF00354270

Widdows J., Bayne B. L. Temperature acclimation of *Mytilus edulis* with reference to its energy budget // *J. Mar. Biol. Ass. UK*. 1971. Vol. 51. P. 827–843. doi: 10.1017/S0025315400018002

Xing Q., Li Y., Guo H., Yu Q., Huang X., Wang S., Hu X., Zhang L., Bao Z. Cardiac performance: a thermal tolerance indicator in scallops // *Mar. Biol.* 2016. Vol. 163. P. 244. doi: 10.1007/s00227-016-3021-9

Zittier Z. M. C., Bock C., Lannig G., Pörtner H. O. Impact of ocean acidification on thermal tolerance and acid–base regulation of *Mytilus edulis* (L.) from the North Sea // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2015. Vol. 473. P. 16–25. doi: 10.1016/j.jembe.2015.08.001

References

Babkov A. I., Kulakovskii E. E., Kunin B. L. The hydrological regime of some areas of the Chupa Bay of the White Sea in connection with their use for mussel mariculture. *Ekologicheskie issledovaniya perspektivnykh ob"ektov marikul'tury v Belom more: Sb. nauch. tr. = Ecological studies of promising mariculture facilities in the White Sea: Proceed.* Leningrad: ZIN; 1985. P. 4–8. (In Russ.)

Bakhmet I. N., Berger V. Ja., Khalaman V. V. The effect of salinity changes on the heart rate of *Mytilus edulis* specimens from different ecological zones. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2005;318(2):121–126. doi: 10.1016/j.jembe.2004.11.023

Bakhmet I. N. Cardiac activity and oxygen consumption of blue mussels (*Mytilus edulis*) from the White Sea in relation to body mass, ambient temperature and food availability. *Polar Biol.* 2017;40:1959–1964. doi: 10.1007/s00300-017-2111-6

Bakhmet I., Ekimov D. Application of a novel computer-aided system to monitor cardiac activity in a mussel undergoing starfish predation. *Biol. Bull.* 2021;240(3):200–204. doi: 10.1086/714361

Bakhmet I. N., Sazhin A., Maximovich N., Ekimov D. *In situ* long-term monitoring of cardiac activity of two bivalve species from the White Sea, the blue mussel *Mytilus edulis* and horse mussel *Modiolus modiolus*. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*. 2018;99(4):833–840. doi: 10.1017/S0025315418000681

Bayne B. The responses of three species of bivalve mollusc to declining oxygen tension at reduced salinity. *Comp. Biochem. Physiol. A*. 1973;45(3):793–806. doi: 10.1016/0300-9629(73)90082-0

Braby C. E., Somero G. N. Following the heart: temperature and salinity effects on heart rate in native and invasive species of blue mussels (genus *Mytilus*). *J. Exp. Biol.* 2006;209:2554–2566. doi: 10.1242/jeb.02259

Depledge M. H., Andersen B. B. A computer-aided physiological monitoring system for continuous, long-term recording of cardiac activity in selected invertebrates. *Comp. Biochem. Physiol.* 1990;96:474–477. doi: 10.1016/0300-9629(90)90664-E

Eliason E. J., Clark T. D., Hague M. J., Hanson L. M., Gallagher Z. S., Jeffries K. M., Gale M. K., Patterson D. A., Hinch S. G., Farrell A. P. Differences in thermal tolerance among sockeye salmon popu-

lations. *Science*. 2011;332:109–112. doi: 10.1126/science.1199158

Eymann C., Götze S., Bock C., Guderley H., Knoll A. H., Lannig G., Sokolova I. M., Aberhan M., Pörtner H.-O. Thermal performance of the European flat oyster, *Ostrea edulis* (Linnaeus, 1758) – explaining ecological findings under climate change. *Mar. Biol.* 2020;167:17. doi: 10.1007/s00227-019-3620-3

Ivleva I.V. The temperature of the environment and the rate of energy metabolism in aquatic animals. Kiev: Naukova Dumka; 1981. 232 p. (In Russ.)

Jankowsky H.-D. I. Body temperature and external temperature. Precht H., Christophersen J., Hensel H., Larcher W. Temperature and Life. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag; 1973. P. 293–301.

Lesser M. P., Kruse V. A. Seasonal temperature compensation in the horse mussel, *Modiolus modiolus*: metabolic enzymes, oxidative stress and heat shock proteins. *Comp. Biochem. Physiol. A*. 2004;137:495–504. doi: 10.1016/j.cbpb.2003.10.022

Marshall D. J., McQuaid C. D. Effects of hypoxia and hyposalinity on the heart beat of the intertidal limpets *Patella granularis* (Prosobranchia) and *Siphonaria capensis* (Pulmonata). *Comp. Biochem. Physiol. A*. 1993;106:65–68. doi: 10.1016/0300-9629(93)90040-B

Marshall D. J., McQuaid C. D. Relationship between heart rate and oxygen consumption in the intertidal limpets *Patella granularis* and *Siphonaria oculus*. *Comp. Biochem. Physiol. A*. 1992;103:297–300. doi: 10.1016/0300-9629(92)90583-C

Masanja F., Yang K., Xu Y., He G., Liu X., Xu X., Xiaoyan J., Xin L., Mkuye R., Deng Y., Zhao L. Impacts of marine heat extremes on bivalves. *Front. in Mar. Sci.* 2023;10:1159261. doi: 10.3389/fmars.2023.1159261

Pack K. E., Rius M., Mieszkowska N. Long-term environmental tolerance of the non-indigenous Pacific oyster to expected contemporary climate change conditions. *Mar. Environ. Res.* 2020;164:105226. doi: 10.1016/j.marenvres.2020.105226

Santini G., Williams G. A., Chelazzi G. Assessment of factors affecting heart rate of the limpet *Patella vulgata* on the natural shore. *Mar. Biol.* 2000;137(2):291–296. doi: 10.1007/s002270000339

Segal E. Acclimation in mollusks. *Amer. Zoologist*. 1961;1(2):235–244.

Segal E., Pamparathi K. R., James T. W. Rate of activity as a function of intertidal height within populations of some littoral molluscs. *Nature*. 1953;172:1108–1109. doi: 10.1038/1721108b0

Sokolova I. M., Frederich M., Bagwe R., Lannig G., Sukhotin A. A. Energy homeostasis as an integrative tool for assessing limits of environmental stress tolerance in aquatic invertebrates. *Mar. Environ. Res.* 2012;79:1–15. doi: 10.1016/j.marenvres.2012.04.003

Somero G. N. Linking biogeography to physiology: evolutionary and acclimatory adjustments of thermal limits. *Front Zool.* 2005;2:1. doi: 10.1186/1742-9994-2-1

Somero G. N. The physiology of climate change: how potentials for acclimatization and genetic adaptation will determine ‘winners’ and ‘losers’. *J. Exp. Biol.* 2010;213:912–920. doi: 10.1242/jeb.037473

Stillman J., Somero G. Adaptation to temperature stress and aerial exposure in congeneric species of intertidal porcelain crabs (genus *Petrolisthes*): correlation of physiology, biochemistry and morphology with vertical distribution. *J. Exp. Biol.* 1996;199:1845–1855. doi: 10.1242/jeb.199.8.1845

Sukhotin A. A., Lajus D. L., Lesin P. A. Influence of age and size on pumping activity and stress resistance in the marine bivalve *Mytilus edulis* L. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2003;284(1-2):129–144. doi: 10.1016/S0022-0981(02)00497-5

Widdows J. Effect of temperature and food on the heart beat, ventilation rate and oxygen uptake of *Mytilus edulis*. *Mar. Biol.* 1973;20:269–276. doi: 10.1007/BF00354270

Widdows J., Bayne B. L. Temperature acclimation of *Mytilus edulis* with reference to its energy budget. *J. Mar. Biol. Ass. UK*. 1971;51:827–843. doi: 10.1017/S0025315400018002

Xing Q., Li Y., Guo H., Yu Q., Huang X., Wang S., Hu X., Zhang L., Bao Z. Cardiac performance: a thermal tolerance indicator in scallops. *Mar. Biol.* 2016;163:244. doi: 10.1007/s00227-016-3021-9

Zittier Z. M. C., Bock C., Lannig G., Pörtner H. O. Impact of ocean acidification on thermal tolerance and acid–base regulation of *Mytilus edulis* (L.) from the North Sea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2015;473:16–25. doi: 10.1016/j.jembe.2015.08.001

Поступила в редакцию / received: 02.11.2024; принята к публикации / accepted: 29.11.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бахмет Игорь Николаевич

канд. биол. наук, старший научный сотрудник
лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных

e-mail: igor.bakhmet@gmail.com

Екимов Дмитрий Анатольевич

канд. техн. наук, старший научный сотрудник
лаборатории экологического мониторинга
и моделирования

e-mail: edmitr2007@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Bakhmet, Igor

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Ekimov, Dmitry

Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher

УДК 574.5 (282.05 + 289)

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВИДОВОЙ СТРУКТУРЫ МАКРО- И ПСЕВДОМЕЙОБЕНТОСА В ЛАГУННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ КУТОВОЙ ОБЛАСТИ КИСЛОЙ ГУБЫ (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ, БЕЛОЕ МОРЕ)

А. П. Столяров

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119234)

Проанализирована видовая и пространственная структура сообщества макробентоса и псевдомейобентоса в двух лагунных экосистемах в районе губы Кислой (Кандалакшский залив, Белое море). Всего в исследованных лагунных экосистемах обнаружено 39 видов макробентоса, 13 видов псевдомейобентосных организмов и 10 видов морских трав и водорослей. В лагуне, расположенной рядом с Ершовским озером, встречено больше солоноватоводных и морских эвригалинных видов зообентоса, а в более открытой к морю лагуне обнаружено больше морских менее эвригалинных видов макробентоса. Общие показатели структуры сообщества макро- и псевдомейобентоса (общая плотность и биомасса) на литорали были выше в лагуне, расположенной возле Ершовского озера, что объясняется большим заилинием, меньшим воздействием прилива и течений и, как следствие, более благоприятными условиями для развития многочисленных солоноватоводных и морских эвригалинных видов макро- и псевдомейобентоса в этом районе. Проведенный статистический анализ показал, что наиболее сильные отличия в видовом составе, плотности и биомассе сообщества макро- и псевдомейобентоса наблюдались между верхней литоралью и нижележащими горизонтами литорали (нижняя и средняя литораль). При этом сообщество псевдомейобентоса было более интегрированным по сравнению с макробентосом из-за распространения ювенильных стадий *Tubificoides benedii*, *Macoma balthica*, *Peringia ulvae* по всей литорали.

Ключевые слова: лагунные экосистемы; макро- и псевдомейобентос; видовое разнообразие; пространственная структура; Белое море

Для цитирования: Столяров А. П. Особенности пространственной и видовой структуры макро- и псевдомейобентоса в лагунных экосистемах ктовой области Кислой губы (Кандалакшский залив, Белое море) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 60–72. doi: 10.17076/eco1938

A. P. Stolyarov. FEATURES OF THE SPATIAL AND SPECIES STRUCTURE OF MACRO- AND PSEUDOMEIOBENTHOS IN LAGOON ECOSYSTEMS OF KISLAYA BAY HEAD (GULF OF KANDALAKSHA, WHITE SEA)

Lomonosov Moscow State University (1 Leninskiye Gory, 119234 Moscow, Russia)

The species and spatial structure of the macrobenthos and pseudomeiobenthos communities in two lagoon ecosystems in Kislaya Bay area (Gulf of Kandalaksha, White Sea) is analyzed. All in all, 39 species of macrobenthos, 13 species of pseudomeiobenthos organisms and 10 species of seagrasses and algae were found in the surveyed lagoon ecosystems. The lagoon located near Lake Ershovskoye contained more of brackish-water and marine euryhaline species of zoobenthos, whereas the more open lagoon had more of marine, less euryhaline macrobenthos species. The general indices of the macro- and pseudomeiobenthos community structure (total density and biomass) in the littoral zone were higher in the lagoon located near Lake Ershovskoye, which is explained by its greater siltation, lower impact of tides and currents in the lagoon, and hence more favorable conditions for development of numerous brackish-water and marine euryhaline macro- and pseudomeiobenthos species in the area. Statistical analysis showed that the strongest differences in the species composition, density and biomass of the macro- and pseudomeiobenthos community were observed between the upper-littoral and the lower-lying (lower- and mid-littoral) subzones. At the same time, the pseudomeiobenthos community was more integrated compared to macrobenthos due to the spread of juvenile stages of *Tubificoides benedii*, *Macoma balthica*, *Peringia ulvae* throughout the littoral zone.

Keywords: lagoon ecosystems; macro- and pseudomeiobenthos; species diversity; spatial structure; White Sea

For citation: Stolyarov A. P. Features of the spatial and species structure of macro- and pseudomeiobenthos in lagoon ecosystems of Kislaya Bay head (Gulf of Kandalaksha, White Sea). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 60–72. doi: 10.17076/eco1938

Введение

Прибрежные лагунные экосистемы вследствие своего положения на границе моря и суши, как правило, являются мелководными, транзитными и неустойчивыми [Kennish, Paerl, 2010; Lefrere et al., 2015; Столяров, 2017; Fouad et al., 2019; Boutoumit et al., 2021]. Они сильно зависимы от изменений пресноводного стока, интенсивности штормовых явлений, скорости осадконакопления, органического и химического загрязнения и др. [Бурковский, 2006; Khlebovich, 2015; Комплексные..., 2016; Labay et al., 2016; Столяров, 2017; Fouad et al., 2019; Stolyarov, 2020, 2023; Boutoumit et al., 2021; Лабай и др., 2022].

Макробентос является важным компонентом и достаточно надежным индикатором состояния лагунных экосистем [Fouad et al., 2019; Gravina et al., 2020; Llanos et al., 2020; Boutoumit et al., 2021; Giampaolletti et al., 2023]. Макробентос играет важную роль в переработке донных отложений, рециркуляции питательных веществ, разложении органического вещества в осадке, а также в пищевых сетях [Lefrere et al., 2015; Desrosiers et al., 2019]. Поэтому изучение видовой и пространственной структуры

макробентоса и их личинок (псевдомейобентос) в двух лагунах, различающихся открытостью к морскому бассейну, является актуальным и может способствовать более глубокому пониманию формирования, функционирования и устойчивости этих уникальных экосистем. Ранее мы рассматривали особенности видовой и пространственной структуры макро- и мейобентоса в одной из лагунных экосистем Белого моря [Столяров, 2022]. В настоящей работе основной целью было изучение видовой и пространственной структуры макро- и псевдомейобентоса в двух лагунах, различающихся открытостью к морскому бассейну.

Материалы и методы

Исследование проводили в двух прибрежных экосистемах лагунного типа летом 2016–2018 гг. в районе губы Кислая недалеко от ББС МГУ (рис. 1). Пробы макробентоса традиционно отбирали на шести постоянных разрезах, расположенных последовательно вдоль лагун в направлении от кутового района к морю по мере увеличения солености воды (рис. 1). Каждый разрез включал станции верхней, средней, нижней литорали и сублиторали.

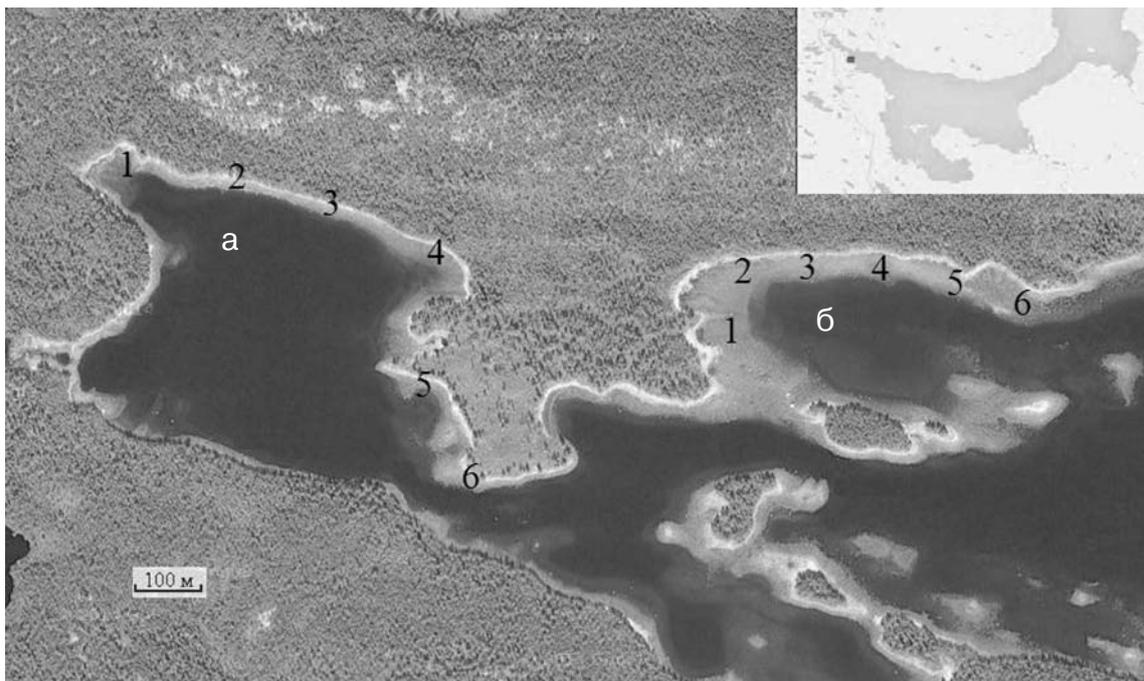


Рис. 1. Карта-схема лагунных экосистем кутовой области Кислой губы, а также расположение разрезов (1–6). На каждом разрезе брались пробы в нижней, средней, верхней литорали (для макро- и псевдомейобентоса) и в sublittoral (только для макробентоса)

Fig. 1. A schematic map of the study area, as well as the location of the sections (1–6). At each section, samples were taken at three stations: in the lower, middle, upper littoral (for macro- and pseudomeiobenthos) and in the sublittoral (only for macrobenthos)

В лагуне, расположенной в самом куту Кислой губы возле Ершовского озера (рис. 1, а), пробы отбирали с 18 литоральных и 7 sublittoralных станций, а в небольшой лагуне на выходе из кутовой области (рис. 1, б) – с 18 и 8 соответственно.

В приливно-отливной полосе на каждой станции брали по два вида проб – рамками 12,5×12,5 и 25×25 см. Мелкие организмы, такие как *Peringia ulvae*, мелкие полихеты и олигохеты, собирали на участке 12,5×12,5 см общей площадью 1/64 м² до глубины 8–10 см. Организмы средних размеров учитывали под рамкой 25×25 см общей площадью 1/16 м² до глубины залегания плотной безжизненной глины (20–35 см). Крупных беспозвоночных, глубоко зарывающихся в грунт (*Arenicola marina* и *Mya arenaria*), учитывали по норкам на площади 1 м² и путем выкапывания пробных экземпляров. На нижней литорали (а иногда и на средней) к стандартному пробоотбору добавлялся отбор в скоплениях *Mytilus edulis*. Дополнительно определяли проективное покрытие пляжа скоплениями мидии. Грунт, взятый с площади 1/64 и 1/16 м², аккуратно промывали и просеивали на сите с ячейей 0,5 и 1 мм соответственно.

Sublittoralный макробентос отбирали с помощью дночерпателя Экмана – Берджи с

площадью захвата 0,025 м². Грунт промывали на сите с ячейей 1 мм.

Пробы просматривали прижизненно в лаборатории. Для расчета биомассы определяли сырой вес организмов.

Псевдомейобентос отбирали на пяти постоянных разрезах в кутовой лагуне возле Ершовского озера (1, 3–6) и в лагуне на выходе из кутовой области Кислой губы (2–6) (рис. 1). Каждый разрез представлял собой три станции, соответствующие трем горизонтам литорали: нижнему, среднему и верхнему. На каждой станции было отобрано по 5 проб под общей площадью 5 см² на глубину 5 см. Полученные пробы грунта фиксировали 4% раствором формальдегида в фильтрованной морской воде. Дальнейшую обработку материала проводили в лаборатории по стандартной методике, принятой для псевдомейобентоса, с использованием сита с диаметром ячейи 70 мкм [Мокиевский, 2009]. При этом просматривали и осадок на фильтре, и профильтрованную через газ взмученную воду. Биомассу псевдомейобентоса пересчитывали исходя из размеров и средней индивидуальной массы представителя каждой группы [Численко, 1968; Удалов и др., 2004; Столяров, Бурковский, 2008; Мокиевский, 2009].

Параллельно со сбором гидробиологического материала измеряли важнейшие параметры среды: соленость (с помощью кондуктометра) на малой (конец отлива – начало прилива) и полной (конец прилива – начало отлива) воде, характер грунта (просеиванием через ряд последовательных сит с размером ячеек 1; 0,5; 0,25; 0,1 мм), рН и Eh среды, а также глубину в сублиторали с помощью маркированного конца с якорем.

Для каждой станции были получены значения плотности и биомассы видовых популяций, а также посчитаны индексы видового разнообразия Шеннона [Shannon, 1948].

Для оценки сходства сообществ, формирующихся на разных станциях (количественные данные), применяли кластерный анализ методом среднего присоединения, построенный на основе матриц сходства Пианки [Pianka, 1974]:

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^S P_{ik} \times P_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^S P_{ik}^2 \times P_{jk}^2}},$$

где P_{ik} , P_{jk} – доля k -го вида для станций i и j , S – число видов.

Этот индекс малочувствителен к различиям по редким признакам, что позволяет нивелировать влияние «хвоста» случайных видов.

При проведении кластерного анализа по качественному составу макрозообентоса применялся индекс сходства Сьеренсена [Sørensen, 1948]:

$$K = 2c / (a + b),$$

где c – число общих видов для сообществ X и Y , a и b – число видов, обнаруженных в сообществе X и Y соответственно.

Для выбора приемлемой степени дробности полученных кластеров учитывался критерий значимого сходства, который рассчитывается как верхняя 95% доверительная граница среднего сходства.

Статистический анализ данных проведен с помощью пакетов прикладных программ PAST v. 3.24 [Hammer et al., 2001] и MS Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Абиотические факторы и характеристика района исследования. Лагунные экосистемы губы Кислая расположены в ее кутовой области в 2,5 км от БС МГУ и отделены от основного бассейна порогами (рис. 1). Первая лагуна (более открытая к морю) расположена в начале порогов и, собственно, ограничена этими порогами от основной акватории,

вторая лагуна расположена в самом куту губы и ограничена своими порогами (рис. 1). Она связана с Ершовским озером узкой перемычкой, что оказывает влияние на солевой режим данного водоема (рис. 1). Изученные экосистемы были примерно одинакового размера (500–600 м) и характеризовались небольшими глубинами (3–5 м). Приливно-отливная полоса лагун несколько различалась – в лагуне рядом с Ершовским озером она была менее широкой с преобладанием песчанисто-илистых и илисто-песчанистых осадков, а в лагуне на выходе из кутовой области Кислой губы характеризовалась в основном мелкозернистыми илистыми песками. Сублитораль лагун представлена в основном песчанистыми илами и илами. Соленость придонной воды в лагунах в период взятия проб (июль–август) была относительно высокой (22–25 ‰), за исключением района кутовой лагуны, примыкающей к Ершовскому озеру, где она снижалась до 15–19 ‰.

Видовой состав и разнообразие сообщества. Всего за исследованный период обнаружено 39 видов беспозвоночных животных, включая их личинок (13 видов), и 10 видов морских трав и водорослей (табл. 1). При этом наибольшего видового разнообразия достигали полихеты (15 видов), моллюски (10 видов) и ракообразные (4 вида), меньше встречено морских звезд (1 вид) и асцидий (1 вид). Заметную роль в сообществе зообентоса играли солонатоводные олигохеты (2 вида) и хиромиды (3 вида), что свидетельствует о некотором опреснении изучаемых лагун (табл. 1). Надо отметить меньшее развитие солонатоводной фауны (меньше хиромид и олигохет) и большее распространение морских видов в открытой лагуне. Морские водоросли (*Fucus vesiculosus*, *Cladophora sericea*) и морская трава *Zostera marina* преимущественное развитие получали в нижнем горизонте литорали. Солончаковые растения (*Juncus atrofuscus*, *Salicornia pojarkovae*, *Triglochin maritima*, *Ruppia maritima*, *Puccinellia maritima*) произрастали в основной верхней литорали и соленом марше. В кутовой лагуне, примыкающей к Ершовскому озеру, наблюдалось большее распространение солончаковых растений и *Z. marina* (табл. 1).

В лагуне, расположенной рядом с Ершовским озером, обнаружено 18 видов зообентоса в сублиторали и 20 видов на литорали (всего 29 видов зообентосных организмов), а в лагуне, расположенной на выходе из кутовой области Кислой губы, – 21 вид в сублиторали и столько же (21) на литорали (всего 32 вида), т. е. в лагуне, расположенной рядом с Ершовским озером, число видов в сублиторали было

Таблица 1. Список видов макробентоса, встреченных в бентали лагун кутового района Кислой губы
Table 1. List of macrobenthos species found in the benthal of the lagoons of the Kislaya Bay head

Макробентос Macrobenthos	Лагуна кутовой области возле Ершовского озера Lagoon of the bay head near Lake Ershovskoye				Лагуна на выходе из кутовой области Кислой губы Lagoon at the exit from the Kislaya Bay head			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Зообентос / Zoobenthos:								
кл./cl. Polychaeta								
1. <i>Harmothoe imbricata</i> (Linnaeus)	-	-	-	-	+	-	-	-
2. <i>Nereimyra punctata</i> (Müller)	+	-	-	-	+	+	-	-
3. <i>Pygospio elegans</i> Claparede*	-	+	+	-	+	-	+	-
4. <i>Scoloplos armiger</i> (O. F. Müller)*	+	+	+	-	+	+	+	-
5. <i>Arenicola marina</i> (Linnaeus)	-	+	+	-	-	+	+	-
6. <i>Alitta virens</i> M. Sars*	-	-	+	-	-	-	-	-
7. <i>Eteone longa</i> (Fabricius)	-	+	+	-	-	-	-	-
8. <i>Fabricia sabella</i> (Ehrenberg)*	-	-	+	-	-	-	-	-
9. <i>Micronephthys minuta</i> (Theel)	+	-	-	-	+	+	-	-
10. <i>Terebellides stroemi</i> Sars*	+	-	-	-	+	-	-	-
11. <i>Pectinaria koreni</i> (Malmgren)	+	-	-	-	+	+	-	-
12. <i>Phyllodoce maculata</i> (Linnaeus)	+	-	-	-	+	-	-	-
13. <i>Ph. citrina</i> Malmgren	-	-	-	-	+	-	-	-
14. <i>Pholoe assimilis</i> Örsted	-	-	-	-	+	-	-	-
15. <i>Sabellides octocirrata</i> (M. Sars)	-	-	-	-	+	-	-	-
кл./cl. Enteropneusta								
16. <i>Saccoglossus mereschkowskii</i> Wagner	+	-	-	-	-	-	-	-
кл./cl. Oligochaeta								
17. <i>Paranais litoralis</i> (Müller)	-	-	+	+	-	-	-	+
18. <i>Tubificoides benedii</i> (d'Udekem)*	-	+	+	+	+	+	+	-
кл./cl. Gastropoda								
19. <i>Littorina littorea</i> (Linnaeus)	-	+	+	+	+	+	+	+
20. <i>L. saxatilis</i> (Olivier)*	-	+	+	+	-	-	+	+
21. <i>L. obtusata</i> (Linnaeus)	-	+	+	-	-	-	+	+
22. <i>Peringia ulvae</i> (Pennant)*	+	+	+	+	+	+	+	+
23. <i>Cylichna alba</i> (Brown)	+	-	-	-	-	-	-	-
24. <i>Cryptonatica affinis</i> (Gmelin)	-	-	-	-	+	-	-	-
кл./cl. Bivalvia								
25. <i>Mytilus edulis</i> Linnaeus*	+	+	+	+	-	+	+	+
26. <i>Macoma balthica</i> (Linnaeus)*	+	+	+	+	+	+	+	+
27. <i>Mya arenaria</i> Linnaeus*	+	+	+	-	-	+	+	-
28. <i>Astarte montagui</i> (Dillwyn)	+	-	-	-	-	-	-	-
кл./cl. Crustacea								
29. <i>Jaera albifrons</i> Leach*	-	+	-	-	-	+	+	-
30. <i>Gammarus duebeni</i> Lilljeborg	-	-	-	+	-	-	+	-
31. <i>Pontoporeia femorata</i> Krøyer	+	-	-	-	+	-	-	-
32. <i>Caprella linearis</i> (Linnaeus)	-	-	-	-	+	-	-	-
кл./cl. Asteroidea								
33. <i>Asterias rubens</i> Linnaeus	-	+	-	-	+	+	-	-
кл./cl. Ascidiacea								
34. <i>Molgula griffithsii</i> (MacLeay)	-	-	-	-	+	-	-	-
кл./cl. Insecta								
35. <i>Chironomus salinarius</i> Kieffer*	-	+	+	-	-	+	-	-
36. <i>Cladotanytarsus mancus</i> Walker	+	+	+	-	-	+	+	-
37. <i>Orthocladius saxicola</i> Kieffer	+	-	-	-	-	-	-	-
тип/phylum Nemertini								
38. <i>Amphiporus lactifloreus</i> (Johnston)	+	+	-	-	+	-	-	+
39. <i>Lineus gesserensis</i> (O. F. Müller)	+	+	+	-	-	-	-	-

Окончание табл. 1
Table 1 (continued)

Макробентос Macrobenthos	Лагуна кутовой области возле Ершовского озера Lagoon of the bay head near Lake Ershovskoye				Лагуна на выходе из кутовой области Кислой губы Lagoon at the exit from the Kislaya Bay head			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Макрофиты (морские травы и водоросли) Macrophytes (sea grasses and algae):								
1. <i>Zostera marina</i> Linnaeus	+	+	+	-	+	+	+	-
2. <i>Cladophora sericea</i> (Hudson) Kützing	+	+	+	+	-	+	+	+
3. <i>Fucus vesiculosus</i> Linnaeus	+	+	-	+	+	-	+	+
4. <i>Juncus atrofuscus</i> Rupr.	-	-	-	+	-	-	-	+
5. <i>Glaux maritima</i> Linnaeus	-	-	-	-	-	-	-	+
6. <i>Aster tripolium</i> Linnaeus	-	+	+	-	-	-	-	+
7. <i>Salicornia pojarkovae</i> N. Semenova	-	-	-	+	-	-	-	-
8. <i>Triglochin maritima</i> Linnaeus	-	-	-	+	-	-	-	+
9. <i>Ruppia maritima</i> Linnaeus	-	-	+	+	-	-	-	-
10. <i>Puccinellia maritima</i> (Hudson) Parl.	-	-	-	+	-	-	-	-

Примечание. «+» – наличие вида, «-» – вид не найден. 1 – сублитораль, 2 – нижняя литораль, 3 – средняя литораль, 4 – верхняя литораль. * – обнаружены ювенильные стадии развития зообентоса (псевдомейобентос).

Note. «+» – species has been registered; «-» – species not found. 1 – sublittoral, 2 – lower littoral, 3 – middle littoral, 4 – upper littoral. * – juvenile stages of development (pseudomeiobenthos) have been detected.

немного меньше, что, вероятно, связано с ее большим опреснением (табл. 1).

Изменения общих показателей структуры сообщества макробентоса происходили в основном в вертикальном направлении относительно приливного уровня. В исследуемых лагунах видовое разнообразие, общая плотность и общая биомасса макробентоса преимущественно увеличивались от верхней литорали к средней и нижней и немного снижались к сублиторали (табл. 2). Снижение общих показателей структуры сообщества в сублиторали лагун (особенно характерное для кутовой лагуны) вызвано значительным заилением бентали и уменьшением плотности популяций или отсутствием видов, характерных для нижней и средней литорали (табл. 1, 2). В сублиторали кутовой лагуны доминировал комплекс менее многочисленных и в основном менее эвригаллиных видов макробентоса *Macoma balthica*, *Nereimyra punctatata*, *Micronephthys minuta*, *Pontoporeia femorata*, *Pectinaria koreni*, *Terebellides stroemi*, *Saccoglossus mereschkowskii*. В нижней и средней литорали преобладали эвригаллиные виды зообентоса *M. edulis*, *Littorina littorea*, *L. saxatilis*, *M. arenaria*, *Peringia ulvae*, *Macoma balthica*, *A. marina*, *Tubificoides benedii*. Сообщества макробентоса верхней литорали были представлены в основном мелкими эвригаллиными видами – брюхоногими моллюсками *P. ulvae*, олигохетами *Paranais littoralis* и *T. benedii* и в меньшей степени брюхоногими моллюсками *L. saxatilis* (табл. 1 и 2).

В лагунах, расположенной на выходе из кутовой области Кислой губы, в сублиторали преобладал примерно тот же комплекс видов, что и в предыдущей лагунах, – *M. balthica*, *L. littorea*, *Scoloplos armiger*, *Nereimyra punctata*, *Micronephthys minuta*, *T. stroemi*, *P. femorata*, *Phyllodoce maculata*, *Harmothoe imbricata*, однако больше было встречено морских менее эвригаллиных видов – *P. koreni*, *Cryptonatica affinis*, *Molgula griffithsii*, *Asterias rubens*. В нижней и средней литорали доминировали *M. balthica*, *L. littorea*, *P. ulvae*, *M. arenaria*, *A. marina*, *A. rubens* и меньше – *M. edulis*. В верхней литорали, которая была не так сильно заилена, как в предыдущей лагунах, доминировали брюхоногие моллюски *L. saxatilis*, меньше было встречено мелких олигохет и брюхоногих моллюсков *P. ulvae*, характерных для илистой литорали кутовой лагуны.

Таким образом, наименьшими видовым разнообразием, общей плотностью и биомассой характеризуются сообщества макробентоса верхней литорали из-за значительного ее осушения и опреснения.

Кроме того, надо отметить, что в кутовой лагунах общие показатели плотности и биомассы макробентоса в приливно-отливной полосе (в верхней, средней и нижней литорали) были выше, чем в открытой лагунах, а в сублиторали, напротив, ниже, что связано с преобладанием на литорали солоноватоводных и морских эвригаллиных видов макробентоса – *T. benedii*, *P. ulvae*, *M. balthica*, *M. edulis*, *L. saxatilis*, *M. arenaria* (больше

Таблица 2. Общие показатели структуры сообщества макрозообентоса в различных лагунных экосистемах Белого моря (Кандалакшский залив)

Table 2. General indices of the structure of the macrozoobenthos community in various lagoon ecosystems of the White Sea (Kandalaksha Bay)

Интегральные показатели структуры сообщества Integral indices of community structure	Районы исследования Study areas	
Лагуна кутовой области Кислой губы рядом с Ершовским озером Lagoon of the bayhead near Lake Ershovskoye		
	Сублитораль Sublittoral	Нижняя литораль Lower littoral
<i>S</i>	5,2 ± 0,8	8,5 ± 0,7
<i>N</i> , экз./м ² <i>N</i> , ind./m ²	1046 ± 282	16309 ± 2313
<i>B</i> , г/м ² <i>B</i> , g/m ²	64 ± 21	1176 ± 379
<i>H_N</i>	1,8 ± 0,3	1,0 ± 0,2
	Средняя литораль Middle littoral	Верхняя литораль Upper littoral
<i>S</i>	7,7 ± 1,0	2,5 ± 0,7
<i>N</i> , экз./м ² <i>N</i> , ind./m ²	17113 ± 3019	4135 ± 2227
<i>B</i> , г/м ² <i>B</i> , g/m ²	277 ± 48	42 ± 19
<i>H_N</i>	0,74 ± 0,12	0,5 ± 0,2
Лагуна, расположенная на выходе из кутовой области Кислой губы Lagoon at the exit from the Kislaya Bay head		
	Сублитораль Sublittoral	Нижняя литораль Lower littoral
<i>S</i>	8,5 ± 0,9	8,8 ± 0,3
<i>N</i> , экз./м ² <i>N</i> , ind./m ²	2450 ± 359	9526 ± 4294
<i>B</i> , г/м ² <i>B</i> , g/m ²	127 ± 26	113 ± 14
<i>H_N</i>	2,1 ± 0,2	1,6 ± 0,4
	Средняя литораль Middle littoral	Верхняя литораль Upper littoral
<i>S</i>	8,3 ± 0,9	3,2 ± 0,6
<i>N</i> , экз./м ² <i>N</i> , ind./m ²	11275 ± 2412	1547 ± 650
<i>B</i> , г/м ² <i>B</i> , g/m ²	156 ± 27	34 ± 10
<i>H_N</i>	0,9 ± 0,2	0,9 ± 0,2

Примечание. Здесь и в табл. 3: *S* – число видов, *N* – общая плотность, *B* – общая биомасса, *H_N* – индекс Шеннона по плотности популяций. «±» – стандартная ошибка.

Note. Here and in Table 3: *S* – number of species, *N* – total density, *B* – total biomass, *H_N* – Shannon index for population density. «±» – standard error.

в кутовой лагуне), а в сублиторали – в основном морских менее эвригалинных беспозвоночных животных – *M. balthica*, *N. punctata*, *M. minuta*, *T. stroemi*, *Ph. maculata*, *P. femorata*, *Harmothoe imbricata*, *P. koreni*, *C. affinis*, *M. griffithsii*, *A. rubens* (больше в открытой лагуне) (табл. 2).

Структура сообщества псевдомейбентоса. Всего было обнаружено 13 видов личинок беспозвоночных: 10 видов в кутовой лагуне

и 12 видов в лагуне на выходе из кутového района Кислой губы (табл. 1). Общая плотность и биомасса личинок беспозвоночных животных в кутовой лагуне были более высокими в средней литорали, немного ниже в нижней и существенно ниже (в 2 раза) – в верхнем горизонте приливно-отливной полосы при доминировании в верхней литорали ювенильных стадий *T. benedii*, *M. balthica*, а в средней и нижней – *M. balthica*, *P. ulvae*, *T. benedii*, *M. edulis* (табл. 3).

Таблица 3. Общие показатели структуры псевдомейобентосного сообщества в различных лагунных экосистемах Белого моря (Кандалакшский залив)

Table 3. General indices of the structure of the pseudomeiobenthos community in various lagoon ecosystems of the White Sea (Kandalaksha Bay)

Интегральные показатели структуры сообщества Integral indices of community structure	Районы исследования Study areas	
Лагуна кутовой области Кислой губы рядом с Ершовским озером Lagoon of the bayhead near Lake Ershovskoye		
	Нижняя литораль Lower littoral	Средняя литораль Middle littoral
S	3,6 ± 0,4	3,8 ± 0,7
N, экз./м ² N, ind./m ²	32800 ± 10556	51200 ± 16193
B, г/м ² B, g/m ²	4,02 ± 1,3	4,98 ± 2,3
	Верхняя литораль Upper littoral	
S	2,4 ± 0,6	
N, экз./м ² N, ind./m ²	29200 ± 4176	
B, г/м ² B, g/m ²	2,2 ± 1,0	
Лагуна, расположенная на выходе из кутовой области Кислой губы Lagoon at the exit from the Kislaya Bay head		
	Нижняя литораль Lower littoral	Средняя литораль Middle littoral
S	3,0 ± 0,5	2,6 ± 0,2
N, экз./м ² N, ind./m ²	18000 ± 3162	19200 ± 4454
B, г/м ² B, g/m ²	2,04 ± 0,6	1,95 ± 0,36
	Верхняя литораль Upper littoral	
S	2,0 ± 0,5	
N, экз./м ² N, ind./m ²	17600 ± 2040	
B, г/м ² B, g/m ²	0,85 ± 0,44	

При этом по плотности популяций доминировали олигохеты *T. benedii*, а по биомассе – *P. ulvae*, *M. balthica*, *M. edulis*.

В лагуне на выходе из кутового района губы Кислая общая плотность псевдомейобентоса была выше в средней литорали (как и в кутовой лагуне) и несколько ниже в нижней и верхней литорали. Показатели же общей биомассы были существенно меньше в верхней литорали и выше в средней и нижней (в 2 раза) литорали (табл. 3). Это объясняется распространением мелких олигохет *T. benedii* и хирономид *Chironomus salinarius* в верхней литорали (также там встречались *P. ulvae* и *M. balthica*) и доминированием в средних и нижних горизонтах литорали ювенильных стадий развития *M. balthica*, *M. arenaria*, *T. stroemi*, *S. armiger*, *P. ulvae* с более высокой индивидуальной массой организмов.

Таким образом, наибольшая плотность и биомасса сообщества псевдомейобентоса в обеих лагунах наблюдалась в основном в средней и нижней литорали, т. е. большинство личиночных стадий развития беспозвоночных животных были приближены к популяциям взрослых организмов.

Также отметим, что биомасса и плотность псевдомейобентоса были выше в лагуне, расположенной в кутовой области возле Ершовского озера (в основном за счет ювенильных стадий развития *T. benedii*, *M. balthica*, *P. ulvae*), что объясняется большим заилением, меньшим воздействием прилива и течений в кутовой лагуне и, как следствие, более благоприятными условиями для развития личинок беспозвоночных животных в этом районе (табл. 3).

Пространственная структура сообщества (сходство станций).

При анализе сходства станций в кутовой лагуне рядом с Ершовским озером по качественному составу макрофитозообентоса обнаружилось различие сообществ макрофитозообентоса разных горизонтов литорали – верхнего (ст. 20–23), среднего и нижнего горизонтов (ст. 8–16) и sublиторали (ст. 3–6, 1, 5, 2) друг от друга (рис. 2). В лагуне на выходе из кутовой области Кислой губы на уровне значимого сходства также можно выделить сообщества верхнего горизонта литорали (ст. 21–26), среднего и нижнего горизонтов (ст. 9–15) и sublиторали (ст. 6–5) (рис. 3).

В sublиторали доминировали в основном менее эвригалинные виды макрофитозообентоса (*N. punctata*, *M. minuta*, *P. femorata*, *P. koreni*, *T. stroemi*, *S. mereschkowskii*, *C. affinis*, *M. griffithsii*), которые были менее сходны с литоральными сообществами макрофитозообентоса. Литоральный макрофитозообентос характеризовался меньшим видовым разнообразием и преобладанием

комплекса эвригалинных видов (*M. balthica*, *P. ulvae*, *T. benedii*, *L. littorea*, *L. saxatilis*, *M. arenaria*, *A. marina*, *M. edulis*). Наиболее отличались сообщества верхней литорали (ст. 20–23, кутовая лагуна, и ст. 21–26, лагуна на выходе) с очень низкими видовым разнообразием и плотностью поселений беспозвоночных животных (значительное осушение, опреснение, заиление) (рис. 2 и 3). Более высоким сходством характеризовались сообщества нижней и средней литорали (ст. 8–16, кутовая лагуна, и ст. 9–15, лагуна на выходе), которые были более сходны между собой, чем с сообществом макрофитозообентоса верхней литорали или sublиторали (рис. 2 и 3).

Кластерный анализ, выполненный на основе плотности или биомассы популяций псевдомейобентоса, показывает достаточно высокое сходство различных сообществ псевдомейобентоса (из-за распространения *T. benedii*, *M. balthica*, *P. ulvae* по всей литорали), что несколько затрудняет их выделение. Тем не менее кластерный анализ, выполненный на основе

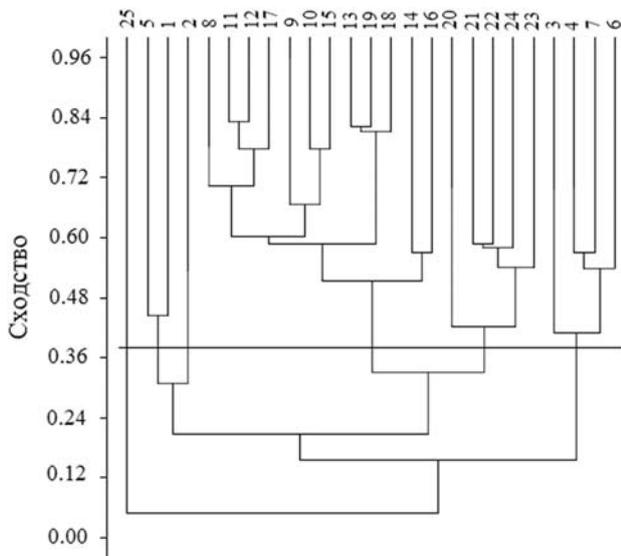


Рис. 2. Дендрограмма сходства сообществ (станций) по качественному составу макрофитозообентоса в лагунной экосистеме, расположенной в кутовой области Кислой губы рядом с Ершовским озером:

1–7 – sublитораль, 8–13 – нижняя литораль, 14–19 – средняя литораль, 20–25 – верхняя литораль. Горизонтальной линией показан уровень значимого сходства

Fig. 2. Dendrogram of the communities' similarity (stations) by the qualitative composition of macrophytozoobenthos in the lagoon ecosystem of the head of the Kislaya Bay near Lake Ershovskoye:

1–7 – sublittoral, 8–13 – lower littoral, 14–19 – middle littoral, 20–25 – upper littoral. The horizontal line shows the level of significant similarity

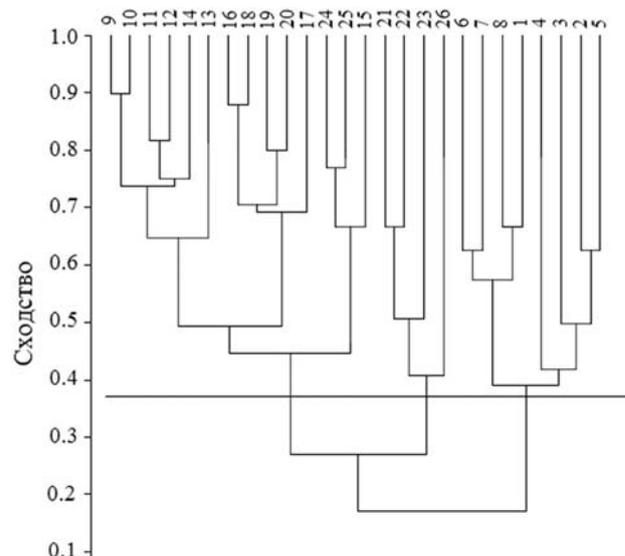


Рис. 3. Дендрограмма сходства сообществ (станций) по качественному составу макрофитозообентоса в лагунной экосистеме, расположенной на выходе из кутовой области Кислой губы:

1–8 – sublитораль, 9–14 – нижняя литораль, 15–20 – средняя литораль, 21–26 – верхняя литораль. Горизонтальной линией показан уровень значимого сходства

Fig. 3. Dendrogram of the communities' similarity (stations) by the qualitative composition of macrophytozoobenthos in the lagoon ecosystem located at the exit from the Kislaya Bay head:

1–8 – sublittoral, 9–14 – lower littoral, 15–20 – middle littoral, 21–26 – upper littoral. The horizontal line shows the level of significant similarity

плотности популяций на уровне значимого сходства, позволяет выделить в кутовой лагуне станции 12, 13, 15 верхней литорали мористого района, к которым примыкает станция 3 нижней литорали (характеризуются низким видовым разнообразием сообщества псевдомейобентоса – в основном личинки *T. benedii* и *M. balthica*), и станции 2–7 нижней, средней и верхней литорали кутового района, где плотность популяций и видовое разнообразие псевдомейобентоса были выше (доминировали личинки *M. balthica*, *T. benedii*, *P. ulvae*, *Pygospio elegans*, *M. edulis*, *T. stroemi*, *S. armiger*, *Fabricia sabella*) (рис. 4).

В лагуне на выходе также выделяются станции 6–9 средней и нижней литорали, с преобладанием *M. balthica*, *T. benedii*, *P. ulvae*, *T. stroemi*, *S. armiger*, *Alitta virens*, *M. arenaria*, и станции 3–11 в основном верхней литорали, где доминируют *T. benedii*, *M. balthica*, *Ch. salinarius*, *P. ulvae*, *L. saxatilis*, с более низким видовым разнообразием и плотностью популяций псевдомейобентоса (рис. 5).

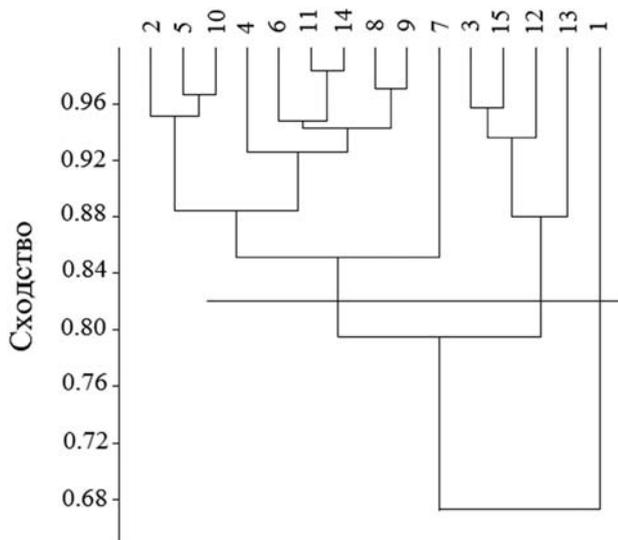


Рис. 4. Дендрограмма сходства (индекс Пианки) сообществ псевдомейобентоса (по плотности популяций) в лагунной экосистеме, расположенной в кутовой области Кислой губы рядом с Ершовским озером: 1–5 – нижняя литораль, 6–10 – средняя литораль, 11–15 – верхняя литораль. Горизонтальной линией показан уровень значимого сходства

Fig. 4. Dendrogram of similarity (Pianka index) of pseudomeiobenthos communities (by population density) in the lagoon ecosystem of the head of Kislaya Bay near Lake Ershovskoye:

1–5 – lower littoral, 6–10 – middle littoral, 11–15 – upper littoral. The horizontal line shows the level of significant similarity

Таким образом, наиболее сильные отличия в видовом составе, плотности и биомассе сообщества макро- и псевдомейобентоса наблюдались между верхней литоралью и нижележащими горизонтами приливно-отливной полосы (нижняя и средняя литораль). При этом сообщество псевдомейобентоса было более интегрированным по сравнению с макробентосом (из-за распространения ювенильных стадий *T. benedii*, *M. balthica*, *P. ulvae* по всей литорали).

Заключение

Всего в исследованных лагунных экосистемах обнаружено 39 видов макробентоса, 13 видов псевдомейобентосных организмов и 10 видов морских трав и водорослей. Наиболее высокого видового разнообразия достигали полихеты (15 видов), моллюски (6 видов брюхоногих и 4 вида двустворчатых) и ракообразные (4 вида). Заметную роль в сообществе макрозообентоса играли солоноватоводные олигохеты (2 вида) и хирономиды (3 вида).

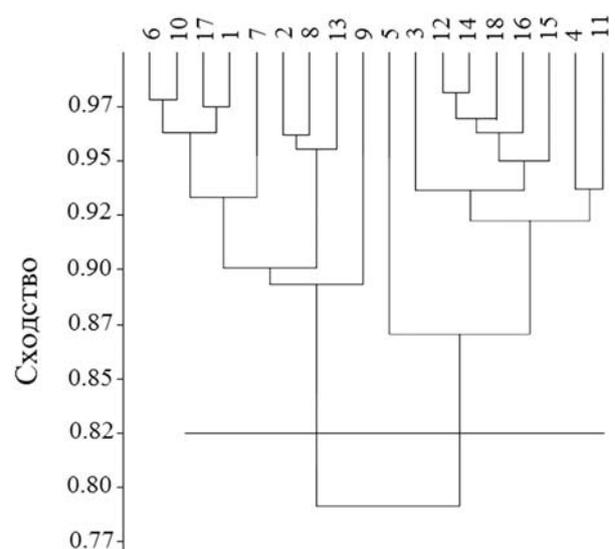


Рис. 5. Дендрограмма сходства (индекс Пианки) сообществ псевдомейобентоса (по плотности популяций) в лагунной экосистеме, расположенной на выходе из кутовой области Кислой губы:

1–6 – нижняя литораль, 7–12 – средняя литораль, 13–18 – верхняя литораль. Горизонтальной линией показан уровень значимого сходства

Fig. 5. Dendrogram of similarity (Pianka index) of pseudomeiobenthos communities (by population density) in the lagoon ecosystem located at the exit from the Kislaya Bay head:

1–6 – lower littoral, 7–12 – middle littoral, 13–18 – upper littoral. The horizontal line shows the level of significant similarity

Это свидетельствует о некотором опреснении исследованных лагун. Проведенный статистический анализ показал, что наиболее сильные отличия в видовом составе, плотности и биомассе сообщества макро- и псевдомейобентоса наблюдались между верхней литоралью и нижележащими горизонтами литорали (нижняя и средняя литораль). При этом сообщество псевдомейобентоса было более интегрированным по сравнению с макробентосом из-за распространения ювенильных стадий *Tubificoides benedii*, *Macoma balthica*, *Peringia ulvae* по всей литорали. В лагуне, расположенной рядом с Ершовским озером, больше встречено солонатоводных и морских эвригаллиных видов зообентоса, а в более открытой лагуне обнаружено больше морских менее эвригаллиных видов макробентоса. Общие показатели структуры сообщества макро- и псевдомейобентоса (общая плотность и биомасса) на литорали были выше в лагуне, расположенной возле Ершовского озера, что объясняется большим заиливанием, меньшим воздействием прилива и течений и, как следствие, более благоприятными условиями для развития многочисленных солонатоводных и морских эвригаллиных видов бентосных организмов в этом районе. В продольном направлении от кутовых районов лагун к морю изменения структурных характеристик сообществ макро- и псевдомейобентоса были менее выражены. Вероятно, это связано с небольшой протяженностью и малым градиентом солености воды в пределах акватории исследуемых лагунных экосистем, особенно по сравнению с типичными эстуарными экосистемами (например, в эстуарии р. Черной соленость варьировала от 0 до 22–24 промилле), меньшим влиянием этого фактора на распределение гидробионтов и, как следствие, меньшими изменениями видовой и пространственной структуры сообщества вдоль продольной оси данных лагун [Столяров, Бурковский, 2008; Khlebovich, 2015; Столяров, 2017; Лабай и др., 2022].

Литература

- Бурковский И. В. Морская биогеоценология. Организация сообществ и экосистем. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2006. 285 с.
- Комплексные исследования Бабьего моря, полуизолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота – изменения на фоне трансгрессии берегов (Труды Беломорской биостанции МГУ. Т. 12) / Под общ. ред. В. О. Мокиевского, А. И. Исаченко, П. Ю. Дгебуадзе, А. Б. Цетлина. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. 243 с.
- Лабай В. С., Корнеев Е. С., Абрамова Е. В., Ушаков А. А., Ахмадеева Е. С. Макробентос эстуария типичной «лососевой» реки острова Сахалин (на примере р. Мануй) // Известия ТИНРО. 2022. Т. 202, № 3. С. 640–660. doi: 10.26428/1606-9919-2022-202-640-660
- Мокиевский В. О. Экология морского мейобентоса. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2009. 286 с.
- Столяров А. П. Эстуарные экосистемы Белого моря. М.; Владимир: Калейдоскоп, 2017. 359 с.
- Столяров А. П. Особенности пространственной структуры сообщества макро- и мейобентоса лагунной экосистемы кутовой области Кислой губы (Кандалакшский залив, Белое море) // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 8. С. 88–100. doi: 10.17076/eco1572
- Столяров А. П., Бурковский И. В. Пространственная структура мейобентоса и ее изменения в летний период в эстуарии реки Черной (Кандалакшский залив, Белое море) // Успехи современной биологии. 2008. Т. 128, № 2. С. 145–159.
- Удалов А. А., Бурковский И. В., Мокиевский В. О., Столяров А. П., Мазей Ю. А., Сабурова М. А., Чертопруд М. В., Чертопруд Е. С., Ильинский В. В., Колобов М. Ю., Пономарев С. А. Изменение основных характеристик микро-, мейо- и макробентоса по градиенту солености в эстуарии Белого моря // Океанология. 2004. Т. 44, № 4. С. 549–560.
- Численко Л. Л. Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела (морской мезобентос и планктон). Л.: Наука, 1968. 106 с.
- Boutoumit S., Bououarour O., El Kamcha R., Pouzet P., Zourarah B., Benhoussa A., Maanan M., Bazairi H. Spatial patterns of macrozoobenthos assemblages in a sentinel coastal lagoon: biodiversity and environmental drivers // J. Mar. Sci. Eng. 2021. Vol. 9(5). Art. 461. doi: 10.3390/jmse9050461
- Desrosiers M., Usseglio-Polatera P., Archaimbault V., Larras F., Méthot G., Pinel-Alloul B. Assessing anthropogenic pressure in the St. Lawrence River using traits of benthic macroinvertebrates // Sci. Total Environ. 2019. Vol. 649. P. 233–246. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.267
- Fouad M., Bessi H., Benhra A., Bouhallaoui M. The benthic community used as bioindicator for assessment of the quality of a Moroccan coastal ecosystem: Moulay Bousseham Lagoon // Int. J. Eng. Res. Technol. 2019. Vol. 8, no. 3. P. 127–133.
- Giampaolletti J., Sbrana A., Magni P., Gravina M. F. Macrobenthos of the Tortoli Lagoon: A peculiar case of high benthic biodiversity among Mediterranean lagoons // Diversity. 2023. Vol. 15(6). Art. 783. doi: 10.3390/d15060783
- Gravina M. F., Cabiddu S., Como S., Floris A., Padedda B. M., Pusceddu A., Magni P. Disentangling heterogeneity and commonalities in nanotidal Mediterranean lagoons through environmental features and macrozoobenthic assemblages // Estuar. Coast. Shelf Sci. 2020. Vol. 237. Art. 106688. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106688
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontol. Electron. 2001. Vol. 4, no. 1. P. 1–9.

Kennish M. J., Paerl H. W. (eds.). Coastal lagoons: critical habitats of environmental change // Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change. Boca Raton: CRC Press, 2010. P. 1–15.

Khlebovich V. V. Applied aspects of the concept of critical salinity // *Biol. Bull. Rev.* 2015. Vol. 5, no. 6. P. 562–567.

Labay V. S., Kurilova N. V., Shpilko T. S. Seasonal variability of macrozoobenthos in a lagoon having a periodic connection with the sea (Ptich'e Lake, southern Sakhalin) // *Biol. Bull.* 2016. Vol. 43, no. 9. P. 988–1002.

Lefrere L., Ouassas M., Guillois B., Gillet P., Moukrim A. Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments in the Khnifiss lagoon, South of Morocco // *Mater. Environ. Sci.* 2015. Vol. 6, no. 11. P. 2226–2236.

Llanos E. N., Saracho Bottero M. A., Jaubet M. L., Elias R., Garaffo G. V. Functional diversity in the intertidal macrobenthic community at sewage-affected shores from Southwestern Atlantic // *Mar. Pollut. Bull.* 2020. Vol. 157. Art. 111365. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111365

Pianka E. R. Niche overlap and diffuse competition // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1974. Vol. 71, no. 5. P. 2141–2145. doi: 10.1073/pnas.71.5.2141

Shannon C. E. The mathematical theory of communication // *Bell Syst. Tech. J.* 1948. Vol. 27(3). P. 379–423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Stolyarov A. P. Species diversity and trophic structure of macrobenthos communities in lagoon ecosystems (Kandalaksha bay, White sea) // *Biol. Bull.* 2020. Vol. 47, no. 8. P. 1–9. doi: 10.1134/S1062359020080130

Stolyarov A. P. Characteristics of the specific, spatial, and trophic structure of macrobenthos in the lagoon ecosystem of Nikolskaya Bay (Kandalaksha Gulf, White Sea) // *Moscow University Biological Sciences Bulletin.* 2023. Vol. 78, no. 1. P. 31–38. doi: 10.3103/S0096392523010054

Sørensen T. A. A new method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analysis of the vegetation on Danish commons // *Kngl. Dan. Videnskab. Selskab. Biol. Skr.* 1948. Vol. 5, no. 4. P. 1–34.

References

Boutoumit S., Bououarour O., El Kamcha R., Pouzet P., Zourarah B., Benhoussa A., Maanan M., Bazairi H. Spatial patterns of macrozoobenthos assemblages in a sentinel coastal lagoon: biodiversity and environmental drivers. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021;9(5):461. doi: 10.3390/jmse9050461

Burkovskii I. V. Marine biogeocenology. Organization of communities and ecosystems. Moscow: KMK; 2006. 285 p. (In Russ.)

Chislenko L. L. Nomograms for determining the weight of aquatic organisms by size and body shape (marine mesobenthos and plankton). Leningrad: Nauka; 1968. 106 p. (In Russ.)

Desrosiers M., Usseglio-Polatera P., Archaimbault V., Larras F., Méthot G., Pinel-Alloul B. Assessing anthropogenic pressure in the St. Lawrence River using traits of benthic macroinvertebrates. *Sci. Total*

Environ. 2019;649:233–246. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.267

Fouad M., Bessi H., Benhra A., Bouhallaoui M. The benthic community used as bioindicator for assessment of the quality of a Moroccan coastal ecosystem: Moulay Bouselham Lagoon. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2019;8(3):127–133.

Giampaolletti J., Sbrana A., Magni P., Gravina M. F. Macrobenthos of the Tortoli Lagoon: A peculiar case of high benthic biodiversity among Mediterranean lagoons. *Diversity.* 2023;15(6):783. doi: 10.3390/d15060783

Gravina M. F., Cabiddu S., Como S., Floris A., Padedda B. M., Pusceddu A., Magni P. Disentangling heterogeneity and commonalities in nanotidal Mediterranean lagoons through environmental features and macrozoobenthic assemblages. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2020;237:106688. doi: 10.1016/j.ecss.2020.106688

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* 2001;4(1):1–9.

Kennish M. J., Paerl H. W. (eds.). Coastal lagoons: critical habitats of environmental change. *Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change.* Boca Raton: CRC Press; 2010. P. 1–15.

Khlebovich V. V. Applied aspects of the concept of critical salinity. *Biol. Bull. Rev.* 2015;5(6):562–567.

Labay V. S., Kurilova N. V., Shpilko T. S. Seasonal variability of macrozoobenthos in a lagoon having a periodic connection with the sea (Ptich'e Lake, southern Sakhalin). *Biol. Bull.* 2016;43(9):988–1002.

Labay V. S., Korneev E. S., Abramova E. V., Ushakov A. A., Akhmadeeva E. S. Macrobenthos in the estuary of a typical «salmon» river of Sakhalin Island (on example of the Manuy River). *Izvestiya TINRO.* 2022;202(3):640–660. (In Russ.). doi: 10.26428/1606-9919-2022-202-640-660

Lefrere L., Ouassas M., Guillois B., Gillet P., Moukrim A. Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments in the Khnifiss lagoon, South of Morocco. *Mater. Environ. Sci.* 2015;6(11):2226–2236.

Llanos E. N., Saracho Bottero M. A., Jaubet M. L., Elias R., Garaffo G. V. Functional diversity in the intertidal macrobenthic community at sewage-affected shores from Southwestern Atlantic. *Mar. Pollut. Bull.* 2020;157:111365. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111365

Mokievskii V. O. Ecology of the marine meiobenthos. Moscow: KMK; 2009. 286 p. (In Russ.)

Mokievskii V. O., Isachenko A. I., Dgebuadze P. Yu., Tsetlin A. B. (eds.). Comprehensive studies of the Babye Sea Bay, a semi-isolated lagoon in the White Sea: Geology, hydrology, biota – changes against the background of coast transgression. *Trudy Belomorskoi biostantsii MGU = Proceed. The White Sea Biol. Station MSU.* Vol. 12. Moscow: KMK; 2016. 243 p. (In Russ.)

Pianka E. R. Niche overlap and diffuse competition. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1974;71(5):2141–2145. doi: 10.1073/pnas.71.5.2141

Shannon C. E. The mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.* 1948;27(3):379–423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Stolyarov A. P., Burkovskii I. V. Spatial structure of meiobenthos and its changes in the summer period

in the estuary of the Chernaya River (Kandalaksha Bay, White Sea). *Uspekhi sovrem. biol. = Advances in Current Biol.* 2008;128(2):145–159. (In Russ.)

Stolyarov A. P. Estuarine ecosystems of the White Sea. Moscow-Vladimir: Kaleidoskop; 2017. 359 p. (In Russ.)

Stolyarov A. P. Species diversity and trophic structure of macrobenthos communities in lagoon ecosystems (Kandalaksha Bay, White Sea). *Biol. Bull.* 2020;47(8): 1–9. doi: 10.1134/S1062359020080130

Stolyarov A. P. Features of the spatial structure of the macro- and meiobenthos community of the lagoon ecosystem of Kislaya Bay head (Gulf of Kandalaksha, White Sea). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2022;8:88–100. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1572

Stolyarov A. P. Characteristics of the specific, spatial, and trophic structure of macrobenthos in the lagoon ecosystem of Nikolskaya Bay (Kandalaksha Gulf, White Sea). *Moscow University Biological Sciences Bulletin.* 2023;78(1):31–38. doi: 10.3103/S0096392523010054

Sørensen T. A. A new method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analysis of the vegetation on Danish commons. *Kngl. Dan. Videnskab. Selskab. Biol. Skr.* 1948;5(4):1–34.

Udalov A. A., Burkovskii I. V., Mokievskii V. O., Stolyarov A. P., Mazei Yu. A., Saburova M. A., Chertoprud M. V., Chertoprud E. S., Il'inskiy V. V., Kolobov M. Yu., Ponomarev S. A. Changes in the main characteristics of micro-, meio- and macrobenthos along the salinity gradient in the estuary of the White Sea. *Okeanologiya = Oceanology.* 2004;44(4):549–560. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 30.07.2024; принята к публикации / accepted: 06.11.2024.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Столяров Андрей Павлович

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник
кафедры общей экологии и гидробиологии
биологического факультета

e-mail: macrobenthos@mail.ru

CONTRIBUTOR:

Stolyarov, Andrey

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

УДК 556.555 : 639.37

КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ ОЗЕРА ВЕНДЮРСКОЕ ЗИМОЙ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФОРЕЛЕВОГО ХОЗЯЙСТВА

Г. Э. Здравеннова*, Н. И. Пальшин, Р. Э. Здравеннов,
С. Р. Богданов, Т. В. Ефремова, С. И. Смирнов, Ю. С. Новикова

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185030),
*zdrovennova@gmail.com

Приведены результаты анализа межгодовой изменчивости (2007–2024 гг.) содержания растворенного кислорода в воде небольшого озера Вендюрское (юг Карелии), в котором с 2011 г. функционирует форелевое хозяйство. Использованы данные измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода по столбу воды на 10–15 горизонтах в центральной глубоководной части озера в круглогодичном режиме. Показано, что сразу после установления льда начинается уменьшение содержания растворенного кислорода, наиболее выраженное в придонных слоях озера и обусловленное бактериальной деструкцией органического вещества. Уже через несколько недель после установления льда развивается дефицит кислорода в придонных слоях центральной котловины, где скапливается оседающее взвешенное органическое вещество. Проанализировано отношение содержания растворенного кислорода в столбе воды в каждый день ледостава C_t к этому показателю в первый день ледостава C_0 . Отношение C_t/C_0 рассматривается как показатель, характеризующий долю потребления кислорода в озере за счет бактериальной деструкции органического вещества. Для выявления межгодовой изменчивости объема потребления кислорода в озере зимой проведено сравнение величины C_t/C_0 на 130-е сутки ледостава в разные годы. В начале периода измерений потребление кислорода в озере зимой достигало 34 % от исходного уровня в первый день ледостава, в конце периода измерений – 48 %, то есть увеличение потребления кислорода за 16 лет составило более 40 %. Увеличение объема потребления кислорода в зимний период за счет роста температуры воды и ускорения метаболизма (9 %) объясняет лишь часть выявленного тренда. Наряду с температурой воды существенный вклад в увеличение потребления кислорода может вносить увеличение количества ОВ, связанное в том числе с деятельностью форелевого хозяйства.

Ключевые слова: мелководное озеро; форелевое хозяйство; температура воды; растворенный кислород; дефицит кислорода; период ледостава

Для цитирования: Здравеннова Г. Э., Пальшин Н. И., Здравеннов Р. Э., Богданов С. Р., Ефремова Т. В., Смирнов С. И., Новикова Ю. С. Кислородный режим озера Вендюрское зимой в условиях функционирования форелевого хозяйства // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 73–83. doi: 10.17076/eco1988

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2021-0019, «Роль гидрофизических процессов в экосистемах мелководных озер. Современное состояние и прогноз развития экосистем малых озер Карелии при антропогенном воздействии и климатических изменениях»).

G. E. Zdorovenova*, N. I. Palshin, R. E. Zdorovenov, S. R. Bogdanov, T. V. Efremova, S. I. Smirnov, Iu. S. Novikova. OXYGEN REGIME OF LAKE VENDYURSKOE IN WINTER IN RESPONSE TO TROUT FARM OPERATIONS

*Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky Ave., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zdorovenova@gmail.com*

The article presents the results of an analysis of interannual variability (2007–2024) of the dissolved oxygen content in water of a small Lake Vendyurskoe (southern Karelia, Russia), where a trout farm has been operating since 2011. The data on water temperature and dissolved oxygen content in the water column at 10–15 depths in the central deep-water part of the lake in the year-round mode are used. It is shown that immediately after ice-on, the dissolved oxygen content begins to decline, most significantly near the bottom, due to bacterial destruction of organic matter. Already a few weeks after ice-on, oxygen deficiency develops in the bottom layers of the central deep-water basin, where the settling suspended organic matter accumulates. The ratio of the dissolved oxygen content in the water column on each day of the ice period C_t to its content on the first day of freeze-up C_0 was analyzed. The C_t/C_0 ratio is considered as a proxy of the proportion of oxygen consumption in the lake due to bacterial destruction of organic matter. To identify interannual variability in the volume of oxygen consumption in the lake in winter, we compared the C_t/C_0 value on the 130th day of the ice period in different years. At the beginning of the measurement period, oxygen consumption in the lake in winter reached 34 % of the initial level on the first day of ice formation, while at the end of the measurement period it was 48 %, i.e., the increase in oxygen consumption over 16 years was more than 40 %. The increase in oxygen consumption in winter due to the increase in water temperature and acceleration of metabolism (9 %) explains only part of the identified trend. Along with water temperature, a significant contribution to the increase in oxygen consumption is likely made by an increase in the amount of OM, associated, among other things, with the trout farm operations.

Keywords: shallow lake; trout farm; water temperature; dissolved oxygen; oxygen deficiency; ice period

For citation: Zdorovenova G. E., Palshin N. I., Zdorovenov R. E., Bogdanov S. R., Efremova T. V., Smirnov S. I., Novikova Iu. S. Oxygen regime of Lake Vendyurskoe in winter in response to trout farm operations. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 73–83. doi: 10.17076/eco1988

Funding. The study was carried out under state assignment to KarRC RAS (FMEN-2021-0019, “Role of hydrophysical processes in shallow-water lake ecosystems. Current status and forecast of the development of ecosystems of Karelian small lakes under human impact and climate change”).

Введение

Концентрация растворенного кислорода в воде является одним из важнейших показателей, регулирующих функционирование озерной экосистемы. Увеличение или уменьшение концентрации кислорода в воде регулируется рядом физических и химико-биологических процессов, таких как выделение кислорода в результате фотосинтеза и его потребление

при бактериальной деструкции органического вещества, газообмен водной толщи с атмосферой, изменение растворимости газа с изменением температуры воды и др. [Jane et al., 2021]. Снижение концентрации кислорода в придонных слоях озер способствует высвобождению накопленных питательных веществ из отложений в воду [North et al., 2014], что может стимулировать эвтрофирование водоемов. В анаэробных условиях происходит выделение

и накопление парниковых газов, увеличивается их эмиссия [Fernández et al., 2014]. Эти и другие негативные последствия для озерных экосистем, и в конечном итоге для здоровья человека, требуют углубленного изучения изменений кислородного режима озер под влиянием изменений климата и антропогенной деятельности.

Результаты натуральных измерений показывают, что в настоящее время происходят изменения кислородного режима озер [Jane et al., 2021]. В частности, по результатам масштабных исследований, включающих данные 8288 озер Северного полушария, выявлено быстрое ухудшение кислородного режима большинства северных озер в период с 1960 по 2022 год, связанное с увеличением периода летней стратификации на фоне потепления климата [Jansen et al., 2024]. Модельные расчеты прогнозируют снижение концентрации кислорода в озерах в будущем за счет повышения температуры воды и усиления стратификации водной толщи, препятствующей аэрации придонных слоев [Golosov et al., 2012].

Ухудшение кислородного режима озер под влиянием антропогенной деятельности и изменений климата представляет наибольшую опасность для небольших по площади озер (менее 10 км²), в которых в последние десятилетия выявлены наиболее выраженные изменения газового режима, включая увеличение потока парниковых газов с их поверхности [Pi et al., 2022].

Одним из видов хозяйственной деятельности, наносящих существенный вред озерным экосистемам в целом и кислородному режиму озер в частности, является садковое выращивание ценных пород рыб. В Республике Карелия в последние годы все более активно развивается товарное выращивание радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum) – более 80 % объема общероссийского производства этой рыбы осуществляется в озерных садковых форелевых хозяйствах региона [Стерлигова, Ильмаст, 2023]. Исследования, которые проводятся на озерах с действующими форелевыми фермами, показывают, что водные экосистемы испытывают постоянный прессинг в связи с поступлением в воду биогенных веществ, остатков корма, продуктов жизнедеятельности рыб [Китаев и др., 2003; Михайленко, Стерлигова, 2021; Галахина, Зобков, 2022]. В результате постоянной подпитки биогенными веществами, главным образом фосфором и азотом, активизируется развитие фитопланктона, учащаются эпизоды цветения воды, как следствие, увеличивается количество взвешенного органического

вещества и мутность воды, снижается ее прозрачность, ухудшается кислородный режим, происходит заиливание грунтов, меняется состав рыбного сообщества [Решетников и др., 1982; Кучко, Савосин, 2020; Стерлигова, Ильмаст, 2023; Стерлигова и др., 2023]. Подобные изменения представляют опасность для озерных экосистем, что актуализирует изучение озер, в которых располагаются форелевые хозяйства.

В небольшом мезотрофном оз. Вендюрское (юг Карелии) форелевое хозяйство действует с 2011 г. Для того чтобы выяснить, оказывает ли деятельность форелевого хозяйства влияние на кислородный режим этого озера, проанализированы данные круглогодичных многолетних измерений (с 2007 по 2024 г.) содержания растворенного кислорода на нескольких глубинах на автономной станции в центре озера. Основное внимание уделено периоду ледостава, когда газообмен водной толщи озера с атмосферой практически отсутствует, активность фотосинтеза понижена и происходит активное потребление кислорода при бактериальном окислении органического вещества (ОВ) [Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010; Obertegger et al., 2017]. Повышенное поступление биогенных веществ в воду в результате деятельности форелевого хозяйства может способствовать увеличению количества автохтонного ОВ в период открытой воды, а бактериальное разложение новообразованного ОВ способствует истощению кислорода в водной толще озера в последующий зимний сезон. Скопление оседающего ОВ в придонных слоях локальных углублений дна обуславливает наибольшую скорость истощения кислорода в нижней части стратифицированного водного столба [Terzhevik et al., 2009; Тержевик и др., 2010]. Поскольку на скорость бактериальной деструкции ОВ может оказывать влияние температура воды [Kovaleva et al., 2003], были проанализированы ряды температуры воды по данным автономной станции (круглогодичный режим измерений) за 2007–2024 гг.

Цель данной работы – выявление изменений кислородного режима небольшого озера с действующим форелевым хозяйством в зимний период по данным многолетних измерений содержания растворенного кислорода и температуры воды.

Материалы и методы

Небольшое озеро Вендюрское располагается в южной части Карелии (62°10'–62°20' с.ш. 33°10'–33°20' в.д.). Этот водоем ледникового происхождения по особенностям батиметрии

и трофическому статусу довольно типичен для территории Карелии [Тержевик и др., 2010]. Площадь поверхности озера достигает 10,4 км², объем вод – 0,0609 км³ [Озера..., 2013]. Максимальная глубина – 11,3 м, средняя глубина – 5,3 м. Период ледостава продолжается с середины ноября – начала декабря до конца апреля – начала мая (в разные годы от 146 до 192 суток) [Zdorovenov et al., 2013; Zdorovenova et al., 2021]. В период открытой воды озеро неоднократно перемешивается [Smirnov et al., 2024], поэтому может быть отнесено к полимиктическому типу. В период ледостава и летом при усилении стратификации в придонных слоях глубоководной котловины и локальных углублений дна развивается дефицит кислорода [Terzhevik et al., 2009; Zdorovenova et al., 2021].

Форелевое хозяйство действует в озере с 2011 г. Садки форелевого хозяйства располагаются вблизи южного берега озера, а также в южном заливе (рис. 1). Расстояние от форелевых садков на акватории озера до станции измерений составляет около километра.

В центральной глубоководной котловине озера в июле 2007 г. была установлена автономная станция – коса с датчиками температуры и растворенного кислорода (рис. 1). Трос, к которому крепятся датчики, растянут между якорем и плавающим в 1,0–1,5 м от поверхности буем.

Используются датчики температуры и кислорода фирмы RBR Ltd (точность по температуре 0,001 °С, диапазон по кислороду 0–150 %, точность 1 %). Интервал измерений по времени составляет одну минуту. Расстояние между датчиками – от нескольких см в придонном слое до 1,0–2,0 м в водной толще. Измерения проводятся в круглогодичном режиме. В мае-июне и октябре-ноябре коса извлекается из озера для снятия данных и замены элементов питания датчиков, затем помещается на прежнее место. Перерыв в измерениях весной и осенью в разные годы составляет от нескольких часов до нескольких суток. В период с октября 2013 г. по октябрь 2014 г. измерения не проводились в связи с заменой датчиков.

По данным автономной станции исследованы особенности изменения температуры воды и содержания растворенного кислорода в воде озера Вендюрское в период ледостава в разные годы. Для каждого зимнего сезона было рассчитано содержание растворенного кислорода в столбе воды на первые сутки после установления льда C_0 и на каждые следующие сутки C_t ледостава по методике, изложенной в [Zdorovenova et al., 2021]. Отношение C_t/C_0 можно рассматривать как показатель, характеризующий долю потребления кислорода в озере за счет бактериальной деструкции ОВ.

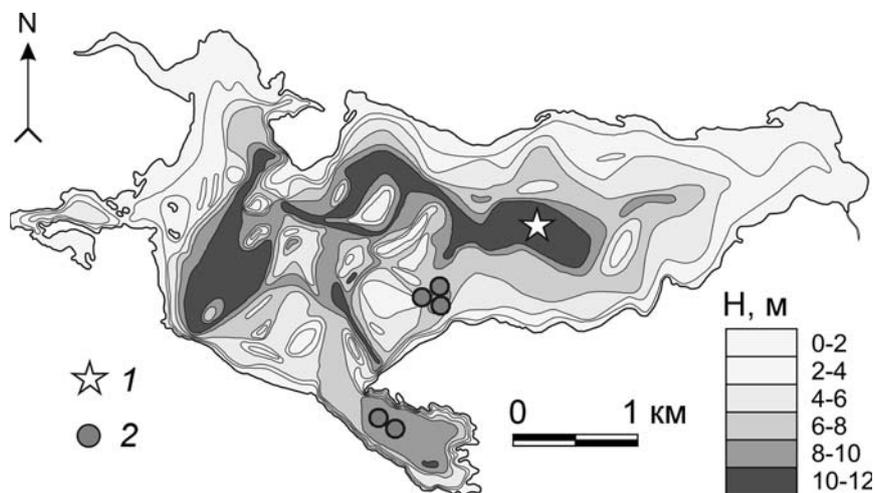


Рис. 1. Батиметрическая карта оз. Вендюрское с положением станции автономных измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода (1) и схематичным положением форелевых садков (2). Общее количество садков на акватории озера и в заливе меняется от года к году, иногда достигая 15–20 шт.

Fig. 1. Bathymetric map of Lake Vendyurskoe, and location of the station for autonomous measurements of water temperature and dissolved oxygen content (1) and schematic location of trout cages (2). The total number of cages in the lake and in the bay varies from year to year, sometimes reaching 15–20 pieces

Для выявления межгодовой изменчивости объема потребления кислорода в озере за период ледостава проведено сравнение величины C_t/C_0 и ее изменения в разные годы. Также проведено сравнение C_t/C_0 на 130-е сутки ледостава в разные годы. Такая продолжительность периода для сравнения разных лет выбрана с учетом того, что минимальная продолжительность ледостава на озере чуть более 140 суток, а в последние дни ледостава в некоторые годы отмечено увеличение содержания кислорода по столбу воды, предположительно, в результате фотосинтеза фитопланктона [Zdorovenнова et al., 2021]. Поскольку температура воды оказывает влияние на бактериальную активность [Kovaleva et al., 2003] и может способствовать ускорению потребления кислорода, проанализирована взаимосвязь между величиной C_t/C_0 в конце зимнего сезона (на 130-е сутки) и двумя параметрами: (1) средней температурой по столбу воды в первый день установления льда и (2) температурой придонного слоя воды в конце зимнего сезона.

Результаты и обсуждение

В предледоставный период водная масса озера охлаждается в полностью перемешанном состоянии, при этом содержание растворенного кислорода по водному столбу однородно и достигает 11–12 мг/л. Установление льда происходило в разные годы при средней температуре по водному столбу в центральной части озера от 0,17 до 2,26 °С.

После установления льда во все годы исследований происходило повышение температуры воды, наиболее выраженное в придонном слое и обусловленное теплообменом с донными отложениями. В качестве примера на рис. 2 (а) приведено изменение температуры воды в зимний сезон 2008–2009 гг. К концу зимнего сезона температура придонного слоя в разные годы повышалась до 4,2–5,8 °С.

Во все годы измерений с первых же дней ледостава происходило уменьшение содержания растворенного кислорода по столбу воды, при этом наибольшая скорость уменьшения кислорода отмечалась в придонном слое (рис. 2, б). В некоторые годы через несколько дней после установления льда происходил промежуточный взлом ледового покрова, при этом водная толща озера полностью перемешивалась и придонные слои насыщались кислородом [Zdorovenнова et al., 2021].

В верхней части водного столба (глубина 2–3 м) уменьшение содержания кислорода за

зимний период составляло примерно 10 %. Толщина придонного слоя, обедненного кислородом (концентрация менее 2 мг/л), в центральной глубоководной котловине достигала 1–2 м к концу зимы в разные годы. Измерения в разных районах озера в зимние месяцы 2001/02 и 2005/06 гг. показали, что снижение концентрации кислорода до близких к нулю значений происходило также в придонных слоях локальных углублений дна на глубинах больше 7,5–8,0 м [Тержевик и др., 2010].

Показатель C_t/C_0 снижался в течение зимы до 0,47–0,69 в разные годы, что соответствовало уменьшению содержания кислорода на 31–53 % относительно первого дня ледостава. На рис. 3 в качестве примера приведено изменение показателя C_t/C_0 в течение зимнего сезона 2009/10 гг. (до начала действия форелевого хозяйства) и 2021/22 гг. (после 10 лет действия форелевого хозяйства).

До начала деятельности форелевого хозяйства C_t/C_0 за 130 суток снижалось до 0,65–0,69, то есть за зимний период потреблялось около 31–35 % от начального содержания кислорода. В годы деятельности форелевого хозяйства отношение C_t/C_0 на 130-е сутки составляло 0,47–0,64, то есть общая убыль кислорода в воде озера зимой увеличилась до 36–53 %, что может являться косвенным признаком увеличения количества ОВ в озере.

Величина C_t/C_0 в конце зимних сезонов 2015/16 и 2020/21 гг. (0,64 и 0,62 соответственно) была соизмерима с годами до начала деятельности форелевого хозяйства. Возможно, это связано с меньшим количеством ОВ, накопленным на предыдущем этапе открытой воды.

Для исследования межгодовых изменений объема потребления кислорода в озере зимой проведено сравнение показателя C_t/C_0 в разные годы на 130-е сутки ледостава (рис. 4). Наряду с заметной межгодовой изменчивостью выявлено уменьшение соотношения C_t/C_0 в конце зимы в период с 2008 по 2024 г. Линейный тренд статистически значим и характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,55$ ($p < 0,01$). Согласно выделенному тренду в начале периода измерений потребление кислорода в озере зимой достигало 34 % от исходного уровня в первый день ледостава, в конце периода измерений – 48 %, то есть увеличение потребления кислорода за 16 лет составило более 40 %.

Тренд на уменьшение C_t/C_0 может быть обусловлен двумя совершенно различными факторами: ростом придонной температуры и ростом количества автохтонного ОВ.

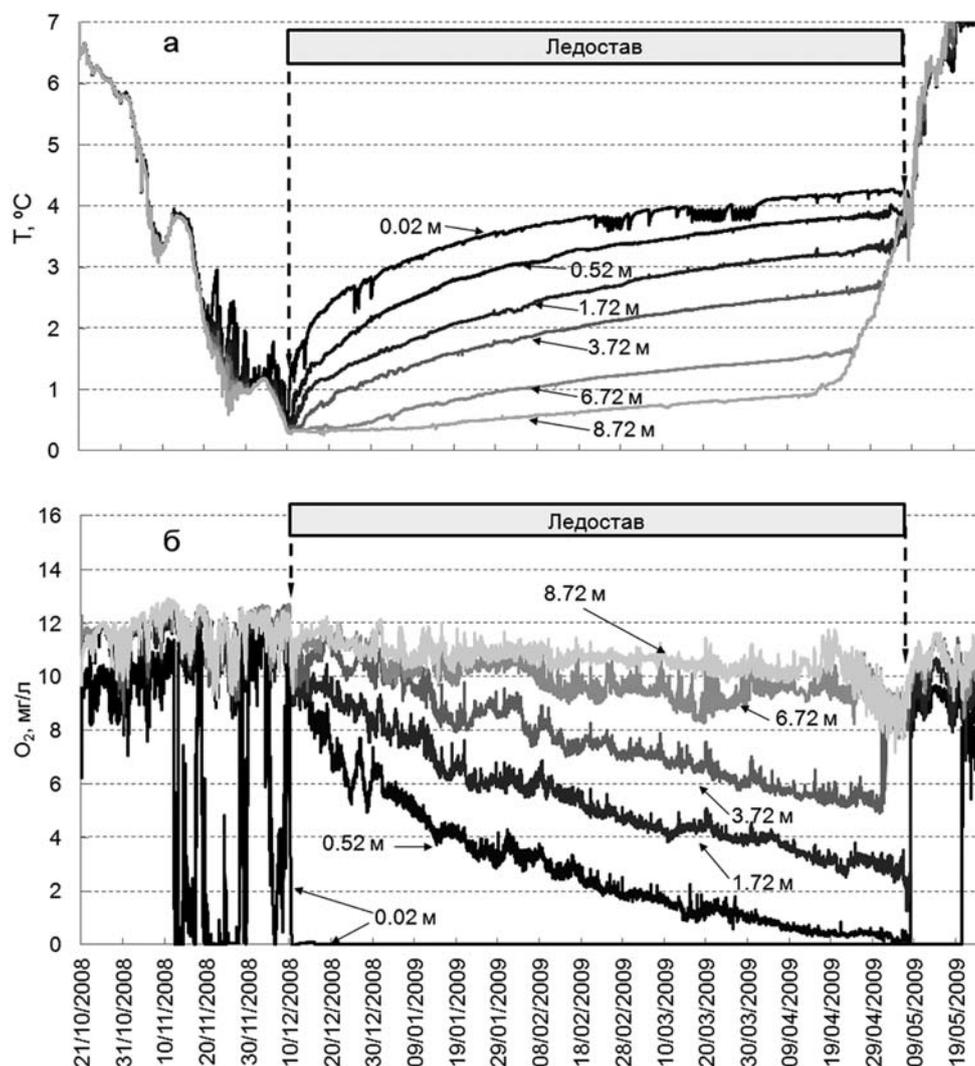


Рис. 2. Температура воды (а) и концентрация растворенного кислорода (б) на некоторых горизонтах измерений в зимний сезон 2008/09 гг. На графике приведены расстояния датчиков от дна. Общая глубина станции 11,3 м, следовательно, верхний датчик косы, удаленный от дна на расстояние 8,72 м, располагался на глубине 2,58 м, а нижний, удаленный от дна на 0,02 м, – на глубине 11,28 м

Fig. 2. Water temperature (a) and dissolved oxygen concentration (б) at some measurement depths in the winter season of 2008/09. The graph shows the distances of the sensors from the bottom (m). The total depth of the station is 11.3 m, therefore, the upper sensor of the chain, located at a distance of 8.72 m from the bottom, was located at a depth of 2.58 m, and the lower sensor, located at a distance of 0.02 m from the bottom, was at a depth of 11.28 m

В качестве одного из факторов, который может ускорять бактериальную деструкцию ОВ и способствовать уменьшению кислорода в озере зимой, рассмотрена температура воды. Исследована взаимосвязь величины C_t/C_0 в конце зимы со средней температурой по столбу воды в день установления льда и температурой придонного слоя воды в конце зимнего сезона (130-е сутки ледостава). За период 2008–2024 гг. выявлено увеличение придонной температуры воды к концу зимнего сезона

на $\sim 0,5$ °C (коэффициент детерминации линейного тренда $R^2 = 0,23$; $p < 0,01$) (рис. 4). То есть в озере зимой складываются условия для ускорения потребления кислорода за счет увеличения температуры воды придонного слоя.

Выявлена обратная зависимость величины C_t/C_0 на 130-е сутки ледостава от средней температуры по столбу воды в день установления льда и от придонной температуры воды в конце зимы (рис. 5). Чем выше была температура по столбу воды в день установления льда

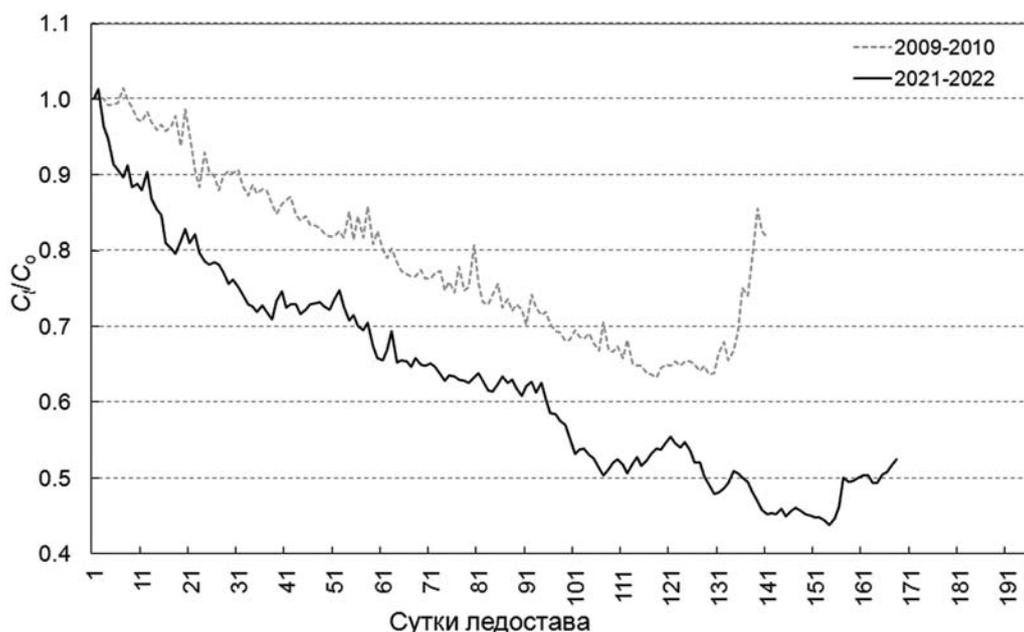


Рис. 3. Отношение C_t/C_0 в разные зимние сезоны

Fig. 3. C_t/C_0 ratio in different winter seasons

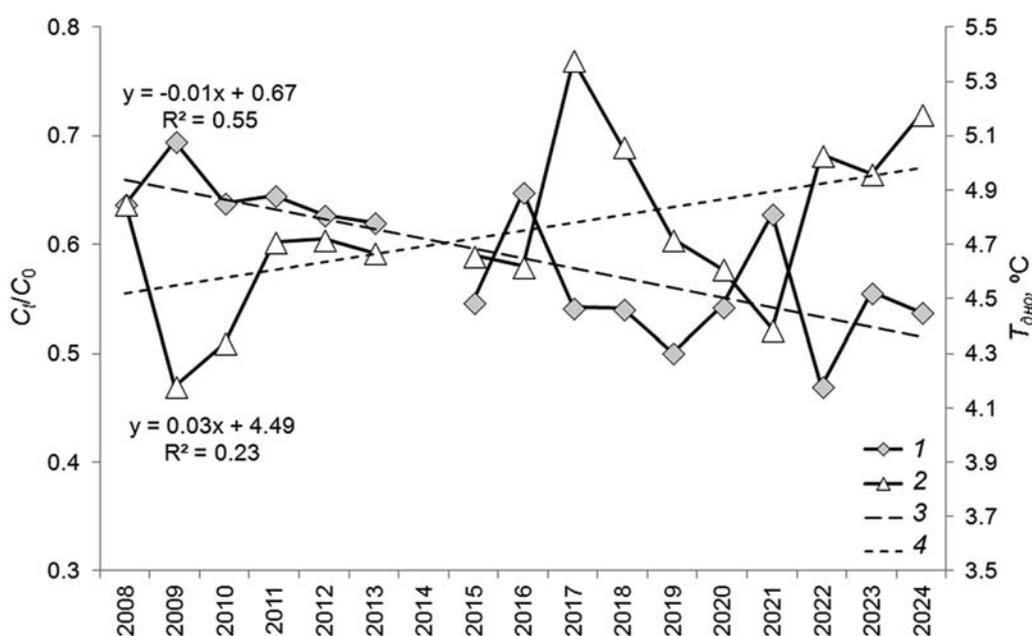


Рис. 4. Отношение C_t/C_0 (1) и температура придонного слоя воды (2) в разные годы на 130-е сутки ледостава. Линейные тренды здесь и на рис. 5: 3 – C_t/C_0 , 4 – $T_{\text{дно}}$

Fig. 4. C_t/C_0 ratio (1) and the temperature of the bottom water layer (2) in different years on the 130th day of ice period. Here and in Fig. 5: 3 and 4 are linear trends

и в придонном слое озера в конце ледостава, тем больший объем кислорода расходовался на протяжении зимнего сезона. Связь величины C_t/C_0 с температурой придонной воды в конце зимы (коэффициент детерминации линейного тренда $R^2 = 0,43$ при $p < 0,01$) выражена более явно, чем с температурой в первый

день ледостава (коэффициент детерминации линейного тренда $R^2 = 0,22$ при $p < 0,01$).

На качественном уровне такую корреляцию можно объяснить увеличением скорости биохимических реакций при повышении температуры. Это увеличение может служить одной из причин обнаруженного тренда роста

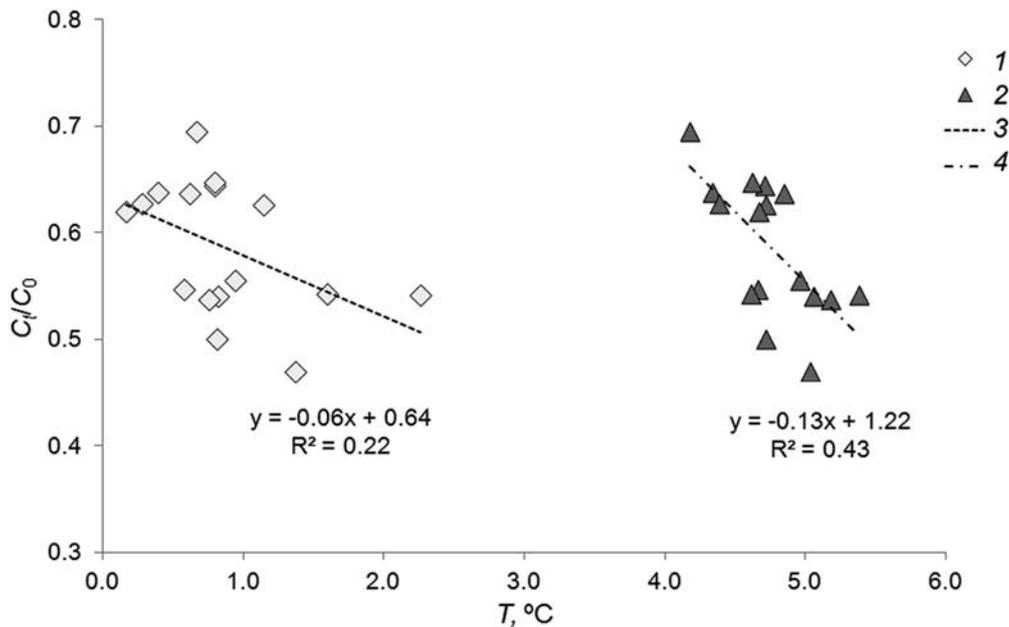


Рис. 5. Зависимость соотношения C_t/C_0 в конце зимы (на 130-е сутки ледостава) в 2008–2024 гг. от средней температуры по водному столбу в центральной глубоководной котловине оз. Вендюрского в день установления льда (1) и от температуры воды придонного слоя на 130-е сутки ледостава (2)

Fig. 5. Dependence of the C_t/C_0 ratio at the end of winter (on the 130th day of ice period) in 2008–2024 on the average temperature of the water column in the central deep-water basin of Lake Vendyurskoe on the day of ice formation (1) and on the temperature of the bottom water layer on the 130th day of ice period (2)

потребления кислорода, даже при том, что придонная температура возрастает лишь на 0,5 °C за рассмотренный период. Дело заключается в том, что скорость метаболизма придонных бактериальных сообществ пресной воды при изменении температуры в диапазоне 0–30 °C изменяется практически на два порядка [Price, Sowers, 2004] и является весьма чувствительной даже к указанным малым изменениям температуры.

Подобный анализ допускает и некоторые количественные оценки, основанные на уравнении Аррениуса для скорости k реакций:

$$\frac{dk}{k} = \frac{E_a}{RT} \frac{dT}{T}. \quad (1)$$

Здесь E_a – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, K . Характерное значение величины E_a в данном случае составляет ~ 110 кДж/моль [Price, Sowers, 2004], при этом первый множитель в правой части (1), играющий роль «коэффициента биологического усиления», близок к 50. Таким образом, при выявленном увеличении

придонной температуры на 0,5 °C в соответствии с (1) можно ожидать увеличения величины K на ~ 9 %, что объясняет лишь часть обнаруженного тренда по уменьшению величины C_t/C_0 .

К сожалению, оценить вклад увеличения количества ОБ в усиление потребления кислорода не представляется возможным в связи с отсутствием данных измерений этого параметра. В этой связи остается лишь предположить, что отношение C_t/C_0 можно рассматривать как косвенный показатель количества ОБ в воде к началу ледостава – чем больше было накоплено в озере ОБ за вегетационный сезон, тем больший объем кислорода будет использован при бактериальной деструкции ОБ в зимний период и тем меньше будет отношение C_t/C_0 в конце зимы. Поскольку показатель C_t/C_0 характеризуется статистически значимым уменьшением на 41 % в зимние сезоны в период 2007–2024 гг., а приведенные оценки вклада от ускорения метаболизма при повышении температуры воды на 0,5° составляют лишь 9 %, можно предположить, что в озере происходило увеличение количества ОБ, в том числе в результате деятельности форелевого хозяйства.

Заключение

Проведенный анализ данных длительных многолетних (2007–2024 гг.) измерений температуры воды и содержания растворенного кислорода в воде озера Вендюрского (юг Карелии) позволил установить увеличение потребления кислорода в озере в зимний период. Тренд на уменьшение C_t/C_0 может быть обусловлен двумя совершенно различными факторами: ростом придонной температуры воды и ростом количества автохтонного ОВ в воде озера.

Выявлена обратная зависимость объема потребленного кислорода в конце зимы от температуры воды в начальный период ледостава и в конце зимы – чем выше была температура при установлении льда и в конце зимы, тем больший объем кислорода потреблялся зимой. Однако выявленная зависимость объема потребления кислорода в зимний период от температуры воды объясняет лишь часть выявленного тренда величины C_t/C_0 . Наряду с температурой воды существенный вклад в увеличение потребления кислорода может вносить увеличение количества ОВ, связанное, в частности, с деятельностью форелевого хозяйства.

Дальнейшие исследования будут направлены на выявление изменений в количестве ОВ в водах озера в разные сезоны года. Также будет проведен углубленный анализ ледовой фенологии озера Вендюрского, тенденций изменений регионального климата и термического режима озера в зимний период.

Литература

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

Китаев С. П., Стерлигова О. П., Павловский С. А., Комулайнен С. Ф., Кучко Я. А. Оценка влияния форелевой фермы на озерно-речную систему р. Лижма (бассейн Онежского озера) // Биология внутренних вод. 2003. № 2. С. 92–99.

Кучко Я. А., Савосин Е. С. Оценка состояния сообществ зоопланктона и макрозообентоса экосистемы Маслозера в зоне размещения форелевого хозяйства // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2020. № 5(172). С. 10–20.

Михайленко В. Г., Стерлигова О. П. Некоторые экологические аспекты садкового выращивания радужной форели // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 12. С. 82–90. doi: 10.17076/eco1509

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Решетников Ю. С., Попова О. А., Стерлигова О. П. и др. Изменение структуры рыбного населения / Отв. ред. М. И. Шатуновский. М.: Наука, 1982. 247 с.

Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В. Ихтиологические и гидробиологические исследования в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 3. С. 113–124. doi: 10.17076/eco1777

Стерлигова О. П., Савосин Е. С., Кучко Я. А., Савосин Д. С., Милянчук Н. П. Состояние экосистемы озера Хедо (западная Карелия) в условиях рыболовной деятельности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Рыбное хозяйство. 2023. № 2. С. 15–23. doi: 10.24143/2073-5529-2023-2-15-23

Тержевик А. Ю., Пальшин Н. И., Голосов С. Д., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Г. Э., Митрохов А. В., Потахин М. С., Шипунова Е. А., Зверев И. С. Гидрофизические аспекты формирования кислородного режима мелководного озера, покрытого льдом // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 568–579.

Fernández J. E., Peeters F., Hofmann H. Importance of the autumn overturn and anoxic conditions in the hypolimnion for the annual methane emissions from a temperate lake // Environ. Sci. Technol. 2014. Vol. 48. P. 7297–7304. doi: 10.1021/es4056164

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2012. Vol. 64. Art. 17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Jane S. F., Hansen G. J. A., Kraemer B. M. et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes // Nature. 2021. Vol. 594. P. 66–70. doi: 10.1038/s41586-021-03550-y

Jansen J., Simpson G. L., Weyhenmeyer G. A., Härkönen L. H., Paterson A. M., del Giorgio P. A., Prairie Y. T. Climate-driven deoxygenation of northern lakes // Nat. Clim. Change. 2024. Vol. 14(8). P. 832–838. doi: 10.1038/s41558-024-02058-3

Kovaleva N. V., Medinets V. I., Gazetov E. I. Effect of temperature and oxygen content on the rate of aerobic oxidation of organic matter in Black Sea water // Gidrobiol. Zh. 2003. Vol. 39, no. 4. P. 34–41. doi: 10.1615/HydrobJ.v39.i6.40

North R. P., North R. L., Livingstone D. M., Köster O., Kipfer P. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift // Glob. Change Biol. 2014. Vol. 20. P. 811–823. doi: 10.1111/gcb.12371

Obertegger U., Obrador B., Flaim G. Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy // Water Resour. Res. 2017. Vol. 53(8). P. 7234–7246. doi: 10.1002/2017WR020599

Pi X., Luo Q., Feng L., Xu Y., Tang J., Liang X., Ma E., Cheng R., Fensholt R., Brandt M., Cai X., Gibson L., Liu J., Zheng Ch., Li W., Bryan B. A. Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes // Nat. Commun. 2022. Vol. 13. Art. 5777. doi: 10.1038/s41467-022-33239-3

Price P. B., Sowers T. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance,

and survival // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2004. Vol. 101. P. 4631–4636.

Smirnov S. I., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Palshin N. I., Smirnovsky A. A., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu., Zdorovenova G. E. Parameters of water column stability in a small polymictic lake in years of different weather conditions // Water Resources. 2024. Vol. 51. P. 299–313. doi: 10.1134/S0097807824700817

Terzhevik A., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Golosov S., Shipunova E., Zverev I., Kirillin G. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia // Aquatic Ecol. 2009. Vol. 43. P. 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Zdorovenova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovenov R., Terzhevik A. Dissolved Oxygen in a Shallow Ice-Covered Lake in Winter: Effect of Changes in Light, Thermal and Ice Regimes // Water. 2021. Vol. 13(17). Art. 2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., Efremova T., Terzhevik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake // Eston. J. Earth Sci. 2013. Vol. 61(1). P. 26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

References

Fernández J. E., Peeters F., Hofmann H. Importance of the autumn overturn and anoxic conditions in the hypolimnion for the annual methane emissions from a temperate lake. *Environ. Sci. Technol.* 2014;48:7297–7304. doi: 10.1021/es4056164

Filatov N. N., Kukharev V. I. (eds.). Lakes of Karelia. Handbook. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 464 p. (In Russ.)

Galakhina N. E., Zobkov M. B. Hydrochemical studies of the trout farming area in Kondopoga Bay of Lake Onego in the winter of 2022. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2022;6:76–87. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1599

Golosov S., Zverev I., Terzhevik A., Kirillin G., Engelhardt C. Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography.* 2012;64:17264. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.17264

Jane S. F., Hansen G. J. A., Kraemer B. M. et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature.* 2021;594:66–70. doi: 10.1038/s41586-021-03550-y

Jansen J., Simpson G. L., Weyhenmeyer G. A., Härkönen L. H., Paterson A. M., del Giorgio P. A., Prairie Y. T. Climate-driven deoxygenation of northern lakes. *Nat. Clim. Change.* 2024;14(8):832–838. doi: 10.1038/s41558-024-02058-3

Kitaev S. P., Sterligova O. P., Pavlovsky S. A., Komulainen S. F., Kuchko Ya. A. Assessment of the influence of a trout farm on the lake-river system of the Lizhma River (Lake Onega basin). *Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology.* 2003;2:92–99. (In Russ.)

Kovaleva N. V., Medinets V. I., Gazetov E. I. Effect of temperature and oxygen content on the rate of aerobic oxydation of organic matter in Black Sea water.

Gidrobiol. Zh. 2003;39(4):34–41. doi: 10.1615/HydrobJ.v39.i6.40

Kuchko Ya. A., Savosin E. S. Assessment of the state of zooplankton and macrozoobenthos communities of the Maslozero ecosystem in the trout farming area. *Rybovodstvo i rybnoe khozyaistvo = Fish Farming and Fish Industry.* 2020;5(172):10–20. (In Russ.)

Mikhailenko V. G., Sterligova O. P. Some ecological aspects of rainbow trout cage rearing. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2021;12:82–90. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1509

North R. P., North R. L., Livingstone D. M., Köster O., Kipfer R. Long-term changes in hypoxia and soluble reactive phosphorus in the hypolimnion of a large temperate lake: consequences of a climate regime shift. *Glob. Change Biol.* 2014;20:811–823. doi: 10.1111/gcb.12371

Obertegger U., Obrador B., Flaim G. Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy. *Water Resour. Res.* 2017;53(8):7234–7246. doi: 10.1002/2017WR020599

Pi X., Luo Q., Feng L., Xu Y., Tang J., Liang X., Ma E., Cheng R., Fensholt R., Brandt M., Cai X., Gibson L., Liu J., Zheng Ch., Li W., Bryan B. A. Mapping global lake dynamics reveals the emerging roles of small lakes. *Nat. Commun.* 2022;13:5777. doi: 10.1038/s41467-022-33239-3

Price P. B., Sowers T. Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2004;101:4631–4636.

Reshetnikov Yu. S., Popova O. A., Sterligova O. P. et al. Changes in the structure of fish populations. Moscow: Nauka; 1982. 247 p. (In Russ.)

Smirnov S. I., Zdorovenov R. E., Efremova T. V., Palshin N. I., Smirnovsky A. A., Bogdanov S. R., Terzhevik A. Yu., Zdorovenova G. E. Parameters of water column stability in a small polymictic lake in years of different weather conditions. *Water Resources.* 2024;51:299–313. doi: 10.1134/S0097807824700817

Sterligova O. P., Ilmast N. V. Ichthyological and hydrobiological studies in Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS.* 2023;3:113–124. (In Russ.). doi: 10.17076/eco1777

Sterligova O. P., Savosin E. S., Kuchko Ya. A., Savosin D. S., Milyanchuk N. P. State of the ecosystem of Lake Khedo (Western Karelia) in conditions of fish breeding. *Vestnik Astrakhanskogo gos. tekhnicheskogo universiteta. Ser. Rybnoe khozyaistvo = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2023;2:15–23. (In Russ.). doi: 10.24143/2073-5529-2023-2-15-23

Terzhevik A., Palshin N., Mitrokhov A., Zdorovenov R., Zdorovenova G., Golosov S., Shipunova E., Zverev I., Kirillin G. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. *Aquatic Ecol.* 2009;43: 617–627. doi: 10.1007/s10452-009-9288-x

Terzhevik A. Yu., Palshin N. I., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Mitrokhov A. V., Potakhin M. S., Golosov S. D., Shipunova E. A., Zverev I. S. Hydro-

physical aspects of oxygen regime formation in a shallow ice-covered lake. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(5):662–673. (In Russ.). doi: 10.1134/S0097807810050064

Zdorovennova G., Palshin N., Golosov S., Efremova T., Belashev B., Bogdanov S., Fedorova I., Zverev I., Zdorovennov R., Terzhevnik A. Dissolved

Oxygen in a Shallow Ice-Covered Lake in Winter: Effect of Changes in Light, Thermal and Ice Regimes. *Water*. 2021;13(17):2435. doi: 10.3390/w13172435

Zdorovennov R., Palshin N., Zdorovennova G., Efremova T., Terzhevnik A. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Eston. J. Earth Sci.* 2013;61(1):26–32. doi: 10.3176/earth.2013.03

Поступила в редакцию / received: 02.11.2024; принята к публикации / accepted: 25.11.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Здорovenнова Галина Эдуардовна

канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель лаборатории гидрофизики

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Пальшин Николай Иннокентьевич

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: npalshin@mail.ru

Здорovenнов Роман Эдуардович

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: romga74@gmail.com

Богданов Сергей Рэмович

докт. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный
сотрудник

e-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

Ефремова Татьяна Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник

e-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Смирнов Сергей Игоревич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

e-mail: sergeysmirnov92@mail.ru

Новикова Юлия Сергеевна

аспирант, младший научный сотрудник

e-mail: novyuliana@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Zdorovennova, Galina

Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher,
Head of Hydrophysics Laboratory

Palshin, Nikolai

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Zdorovennov, Roman

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Bogdanov, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
Leading Researcher

Efremova, Tatyana

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

Smirnov, Sergei

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

Novikova, Iuliia

Graduate Student, Junior Researcher

УДК 504

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ ПРОГРАММЫ ПРИГРАНИЧНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА «КАРЕЛИЯ» И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РЕГИОНАХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Д. В. Базегский, А. В. Васильева*

*Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),
vasnask@gmail.com

Изучен опыт реализации экологических проектов в программах приграничного сотрудничества России и ЕС периода 2014–2020 годов. На примере программы «Карелия» проанализированы результаты проектной деятельности на российской территории, выявлены наиболее удачные примеры использования «зеленых» технологий и наработок для решения локальных экологических проблем. Актуализирован вопрос о дальнейшем использовании опыта, приобретенного в рамках приграничного сотрудничества, в других регионах России, прежде всего относящихся к Арктической зоне Российской Федерации. В частности, наиболее перспективными направлениями для тиражирования представляются деятельность, связанная с экологическим просвещением, и внедрение ресурсо- и энергосберегающих решений. В статье выявлены возможные препятствия для тиражирования наработок и предложены меры по исправлению ситуации, в частности, позволяющие реализовать проекты по водоснабжению и водоочистке в малых городах Российской Арктики. Авторы планируют на следующем этапе исследования обратиться к изучению экологических проектов программы приграничного сотрудничества Россия-ЕС «Коларктик» и подготовить обобщенный материал по двум северным программам в виде методического пособия.

Ключевые слова: экологические проекты; Северо-Запад России; Республика Карелия; программы приграничного сотрудничества Россия-ЕС; Арктическая зона Российской Федерации

Для цитирования: Базегский Д. В., Васильева А. В. Опыт реализации экологических проектов программы приграничного сотрудничества «Карелия» и перспективы его использования в регионах Российской Арктики // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 8. С. 84–93. doi: 10.17076/eco2025

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FMEN-2024-0013, «Вопросы обеспечения экологической безопасности в Арктике»).

D. V. Bazegsky, A. V. Vasilieva*. EXPERIENCE IN IMPLEMENTING ENVIRONMENTAL PROJECTS OF THE KARELIA CBC PROGRAMME AND PROSPECTS FOR ITS USE IN REGIONS OF THE RUSSIAN ARCTIC

*Department for Multidisciplinary Research, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *vasnask@gmail.com*

The article examines the experience from implementing environmental projects of Russia-EU Cross-border Cooperation Programmes 2014–2020. Using the case of the Karelia CBC Programme, the results of project activities on the Russian side were analysed and the most successful examples of green solutions and technologies applied to deal with local environmental problems were identified. The issue of further use of the experience acquired within the framework of cross-border cooperation in other regions of Russia, primarily those belonging to the Arctic zone of the Russian Federation, was raised. Some of the spheres where dissemination may be the most promising include environmental education and implementation of resource-saving and energy efficient solutions. Possible obstacles to the replication of the best practices have been identified and remedial measures have been proposed, in particular to enable the implementation of water supply and treatment projects in towns of the Russian Arctic. In the next stage, the authors plan to study the case of environmental projects of the Kolarctic CBC Programme and to prepare a summary paper on the two northern programmes in the form of a manual.

Keywords: environmental projects; Northwest Russia; Republic of Karelia; Russia-EU CBC Programs; Arctic zone of the Russian Federation

For citation: Bazegsky D. V., Vasilieva A. V. Experience in implementing environmental projects of the Karelia CBC programme and prospects for its use in regions of the Russian Arctic. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 8. P. 84–93. doi: 10.17076/eco2025

Funding. The research was carried out within state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FMEN-2024-0013, Ensuring environmental safety in the Arctic).

Введение

Актуальность проблемы обеспечения экологической безопасности Арктики определяется теми глобальными вызовами, которые стоят сегодня перед этим регионом. Во-первых, в Арктике больше, чем в других частях планеты, ощущается изменение климата. Повышение средних температур приводит к таянию ледников и снежного покрова, уменьшению количества морозных дней и сокращению зимнего периода. Во-вторых, экосистемы региона крайне уязвимы и восприимчивы к изменениям, а процесс их восстановления занимает более длительное время. Применительно к Арктической зоне России проблема сохранения окружающей среды усугубляется нерешенными еще со времен Советского Союза задачами по очистке участков воды и почв, загрязненных в результате деятельности военно-промышленных объектов. В дополнение к старым задачам появляются новые, связанные с современным антропогенным влиянием. Речь идет о хозяйственной

деятельности предприятий и недостаточно эффективной работе по утилизации и переработке бытового мусора. В-третьих, усиливающееся геополитическое противостояние в Арктике, выразившееся в том числе в заморозке участия России в Арктическом Совете и Совете Баренцева Евро-Арктического региона, не способствует организации скоординированной работы заинтересованных стран по сохранению окружающей среды. Санкции Европейского Союза, по сути, отрезали российские организации от рынка современных технологий и оборудования, что объективно ведет, например, к замедлению работы по замене и установке очистных сооружений как на предприятиях, так и в населенных пунктах Российской Арктики. Все вышеперечисленное означает, что решение проблемы экологической безопасности в регионе существенно осложняется.

Следует также отметить, что, несмотря на принимаемые в стране меры по улучшению состояния окружающей среды на арктических территориях, проблем по-прежнему много. Так, например, динамика выбросов загрязняющих

веществ в атмосферный воздух и показателей, характеризующих объемы сброса загрязненных вод за рассматриваемый период, демонстрирует снижение, темпы которого можно охарактеризовать как достаточно низкие. Для отдельных регионов ситуация и вовсе усугубляется (табл.). Другой значимой экологической проблемой можно считать мусор и возникновение несанкционированных свалок. По данным Росприроднадзора, несмотря на достаточно высокие показатели их ликвидации, на арктических территориях фиксируется значительная концентрация свалок.

Как отмечают специалисты, проблемы выбросов загрязняющих веществ, концентрации несанкционированных свалок и сброса сточных вод особенно остро проявляются именно в уязвимых арктических экосистемах с присутствующей им тенденцией к деградации [Bohlmann, Koller, 2020; Васильцов и др., 2021; Li et al., 2022; Решетняк, Коваленко, 2023]. При этом меры по снижению негативных антропогенных влияний имеют определенную «северную» специфику [Седнев и др., 2022]. Перечень перечисленных выше экологических проблем арктических территорий далеко не исчерпывающий.

Динамика выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ от стационарных источников и автомобильного транспорта, тыс. тонн (1), показателей по сбросу загрязненных сточных вод без очистки (2), недостаточно очищенных (3), млн м³

Dynamics of pollutants emission into the atmosphere from stationary sources and motor transport, thousand tons (1), indicators for the discharge of polluted wastewater without treatment (2), insufficiently treated (3), million m³

Регион Region		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Мурманская обл. Murmansk Reg.	1	334	333	332,6	289,4	301,7	274,9	252,9	221	157,1	153,6
	2	60,1	61,8	41,8	31,6	34,6	37,9	27,4	21,7	20,3	17,3
	3	273,5	269,2	286,4	288,2	283,3	260,0	239,1	105,6	110,8	93,6
Республика Карелия Republic of Karelia	1	193,3	172,9	181,8	204	205,5	210,5	144,2	151,2	157,8	154,6
	2	77,4	76,1	76,2	74,3	74,3	75,2	76,0	75,8	76,1	75,6
	3	139,4	143,6	129,4	146,9	146,5	105,0	146,1	95,1	44,6	36,6
Архангельская обл. Arkhangelsk Reg.	1	280,6	286,2	263,6	263,4	250,8	241,8	165,4	156,7	164,3	138,9
	2	28,83	27,97	29,40	28,08	21,73	13,72	11,45	14,47	12,13	14,00
	3	312,2	307,8	300,4	300,5	303,3	309,1	311,4	306,1	280,5	263,5
Ненецкий а. о. Nenets a. a.	1	77,9	89,8	105,8	91,4	104,6	77,7	69,9	61,2	57,6	90,0
	2	0,0	0,01	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3	0,13	0,0	0,0	0,14	0,31	0,42	0,12	0,09	0,0	0,0
Республика Коми Republic of Komi	1	850,6	786,0	691,2	648,6	535,7	568,6	446,6	401	416,9	395,6
	2	8,2	7,9	9,1	7,7	157,1	131,0	126,9	122,6	129,6	124,0
	3	101,2	102,8	108,2	102,5	105,2	135,8	141,7	48,5	46,4	44,1
Ханты-Мансийский а. о. Khanty-Mansi a. a.	1	2087,6	1680,1	1609,1	1651,6	1642	1642	1338,6	1209,6	1297,8	1212
	2	0,62	465,72	384,01	812,21	2,47	1,75	0,58	0,58	0,01	0,02
	3	76,99	79,35	78,97	79,10	83,74	82,22	82,54	93,00	86,43	70,16
Ямало-Ненецкий а. о. Yamal-Nenets a. a.	1	827,8	657	712,4	830,1	867,5	818,8	786,1	899,9	970,1	1052,7
	2	1,34	2,30	1,42	1,12	1,61	1,73	1,57	0,94	1,23	1,60
	3	23,35	20,11	21,67	31,02	29,46	27,59	27,45	27,90	27,36	27,33
Красноярский край Krasnoyarsk Reg.	1	2810,3	2592	2729	2630,3	2629,8	2615,1	2619,8	2727,2	2605,9	2827,7
	2	38,8	38,8	39,7	38,8	43,1	43,6	42,2	44,0	47,1	44,5
	3	352,3	327,9	287,6	274,5	265,3	261,1	275,6	277,6	276,5	254,8
Республика Саха (Якутия) Republic of Sakha (Yakutia)	1	262,3	377,7	359	330,3	318,2	359,2	298,7	297	401,2	349
	2	1,34	2,30	1,42	1,12	1,61	1,73	1,57	0,94	1,23	1,60
	3	23,35	20,11	21,67	31,02	29,46	27,59	27,45	27,90	27,36	27,33
Чукотский а. о. Chukotka a. a.	1	24,8	22,3	26,1	27,6	25	28,2	18,9	18,3	18,8	20,5
	2	4,9	4,8	4,0	3,1	3,0	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9
	3	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04

Примечание. Составлено по: [О состоянии..., 2023].

Note. Compiled after: [On the state..., 2023].

Неблагоприятные экологические параметры создают угрозы для здоровья населения [Макоско, Матешева, 2022] и влияют на комфортность среды проживания [Волков и др., 2023].

В данной статье предпринята попытка проанализировать опыт реализации экологических проектов программ приграничного сотрудничества России и ЕС на примере программы «Карелия» периода 2014–2020 годов (далее – ППС «Карелия»). Представляется, что данный опыт и полученные в ходе реализации проектов экологические решения интересны как в теоретическом, так и в практическом плане. В качестве теоретической составляющей предлагается новый метод оценки международных проектов, который, по мнению авторов, наиболее полно учитывает трансграничный характер программ и позволяет ответить на вопрос, достигли ли они своих целей. В прикладном отношении представляется важным выявить те успешные экологические практики, которые были разработаны совместно с финскими партнерами, а успешная апробация в северных районах Республики Карелия позволяет говорить о перспективах их применения в других арктических регионах России. В этом контексте полагаем оправданным поставить вопрос о распространении опыта российско-европейского приграничного сотрудничества на арктические регионы России, которые в силу схожих природно-климатических условий и малой плотности населения сталкиваются с похожими вызовами в сфере экологии.

Методы исследования

Для реализации цели и задач работы применялся набор научных методов: методы сравнительного и контент-анализа, статистический анализ и картографический метод, социологический опрос и интервьюирование. Информационной базой исследования стали данные Росстата, ведомственные данные Минприроды России и Росприроднадзора, результаты опросов и интервью.

Для получения информации о результатах реализации экологической составляющей программы был разработан и направлен российским участникам проектов специальный опросник, состоящий из 11 вопросов, большая часть которых фокусируется на экологической проблематике. Смысл такого исследовательского подхода заключается в том, чтобы дать возможность оценить итоги проектов представителям тех организаций, которые были непосредственно вовлечены в процесс сотрудничества и, по сути, являются первыми

выгодоприобретателями результатов проектной деятельности. Поскольку Республика Карелия как российский приграничный регион является конечным выгодоприобретателем результатов проектов, целесообразно услышать мнение российских федеральных и региональных властей, ответственных за реализацию программы «Карелия». Для этого был разработан еще один опросник и направлен российским представителям в Совместном мониторинговом (далее – СМК) и Совместном отборочном (далее – СОК) комитетах.

Исследование охватывало 86 % организаций, реализовывавших экологические проекты, и 58 % российских представителей в СМК и СОК, что обеспечивает репрезентативность. Для целей исследования привлекались также материалы промежуточных и итоговых отчетов по проектам. Доступ российских партнеров к интернет-базам программы был закрыт в марте 2022 года, поэтому пришлось опираться на имеющиеся в распоряжении проектантов отчеты.

Результаты и обсуждение

ППС «Карелия» периода 2014–2020 годов. Всего в рамках ППС «Карелия» профинансирован 61 проект с общим бюджетом 42,4 млн евро. Финансирование обеспечивалось вкладами ЕС, России и Финляндии [Joint..., 2019, p. 4, 10]. В их реализации приняла участие 121 российская организация. География проектной деятельности на российской территории не отличается пестротой и вполне логично сконцентрирована в находящихся вблизи российско-финляндской границы населенных пунктах, в которых сосредоточено ядро немногочисленных специалистов, знакомых с проектным менеджментом, владеющих английским языком и имеющих опыт сотрудничества с зарубежными коллегами (рис. 1).

Экологические проекты финансировались ППС «Карелия» по линии приоритета «Чистый и комфортный для проживания регион». Отметим, что это направление сотрудничества являлось одним из самых важных – на проекты данного приоритета была выделена почти половина (44,6 %) грантовых средств программы [Karëlia..., 2023].

Приведем краткий обзор наиболее значимых для регионального развития экологических проектов. В рамках крупного инфраструктурного проекта «Модернизация системы водоснабжения и водоотведения в Сортавале» удалось решить давнюю проблему обеспеченности жителей города чистой питьевой водой.

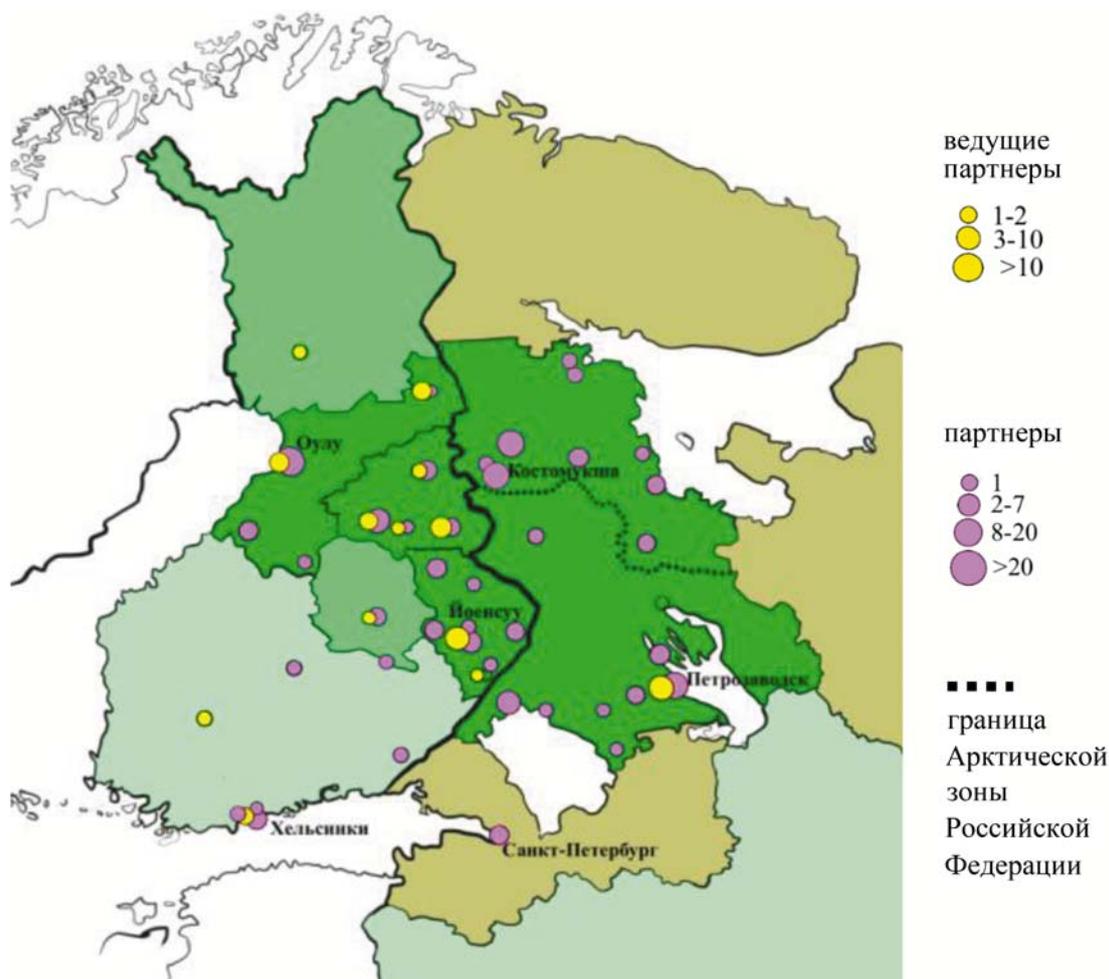


Рис. 1. Картограмма пространственной локализации проектантов
 Fig. 1. Schematic map of the project participants' location

Построен новый водозабор, реконструированы насосные станции [Завершена..., 2024]. В ходе двухлетней реализации проекта «Эко-Бридж» на российской стороне установлены современные автоматические станции контроля качества поверхностных вод, проведено обучение персонала. Карельским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды создана электронная онлайн-система мониторинга качества воды в приграничных водоемах Республики Карелия для российских потребителей [Трансграничная..., 2019]. Ряд проектов («Карелия без мусора», «Устойчивость под давлением») предложили новые решения по сортировке твердого бытового мусора в карельских поселениях. Проведено обучение местного населения раздельной сортировке, в населенных пунктах оборудованы контейнерные площадки и места для компостирования биоотходов. В рамках

проекта «Улучшение экологической ситуации региона путем валоризации муниципальных и промышленных осадков (отходов) сточных вод» АО «ПКС-Водоканал» в Петрозаводске и ООО «Карелводоканал» в Сортавале организовали компостирование и переработку отходов жилищно-коммунального хозяйства в грунт, который используется для благоустройства городских территорий и садовых загородных участков [На канализационных..., 2021]. На ряде туристических объектов и на особо охраняемых природных территориях края начата работа по замене старых источников энергообеспечения на более современные и экологичные (проекты «Зеленые решения», «NatureBest»). В национальном парке «Водлозерский» и в заповедниках «Костомукшский» и «Кивач» установлены солнечные батареи вместо генераторов на дизельном топливе [Алиев, 2020].

Результаты опроса. Обратимся к анализу результатов опроса с учетом фокуса на экологическую проблематику. У представителей федеральных и региональных властей, принимавших участие в управлении программой, не вызывает сомнений, что задачи приоритета «Чистый и комфортный для проживания регион» отражают потребности российской стороны в сфере экологии. Так считает подавляющее (83 %) число респондентов. Представители СМК и СОК также в целом положительно оценивают итоги реализации ППС «Карелия» периода 2014–2020 годов (73 %). Все респонденты ответили, что их ожидания оправдались частично (100 %). Доминирующим обоснованием для такого ответа является нарушение Еврокомиссией условий межправительственного Соглашения о реализации и финансировании ППС «Карелия» периода 2014–2020 годов.

С точки зрения приоритетности проектанты считают, что наибольшее значение реализованные проекты имели для внедрения ресурсосберегающих решений (55 %). Следующим по важности они отметили такое «ноу-хау», как создание условий для привлечения инвестиций в экологический сектор (40 %). Обеспечение населения чистой питьевой водой (35 %), внедрение энергоэффективных решений (35 %), развитие экологического просвещения (35 %),

улучшение системы утилизации твердых бытовых отходов (30 %) также можно отнести к приоритетным экологическим сферам (рис. 2).

Среди членов СМК и СОК оценка результатов проектов выглядит несколько иначе. Явное предпочтение отдано экологическому просвещению и решению проблем водоснабжения и водоотведения (71 %), что соответствует пониманию необходимости вести работу с местным населением и остроте проблем коммунальной сферы.

При этом большинство проектантов (70 %) придерживаются мнения, что эти экологические задачи невозможно было решить без привлечения международного финансирования или без иностранной партнерской организации. Важно отметить, что треть респондентов, считающих реализацию проектов возможной без международного финансирования, но затрудненной из-за отсутствия зарубежного партнера, такой позицией подтверждают факт сформировавшегося механизма трансферта опыта и технологий между партнерскими организациями. Представители управляющих органов программы разошлись во мнениях с проектантами в оценке фактора международного финансирования (рис. 3). Большинство из них считают, что упомянутые задачи в сфере экологии можно было бы решить исключительно за счет российских финансовых инструментов (57 %).



Рис. 2. Ответы на вопрос: Решению каких локальных проблем на российской стороне помогла реализация проектов в сфере экологии?

Fig. 2. Answers to the question: What local problems on the Russian side were solved through environmental projects?

Есть и сторонники противоположного взгляда. В интервью они отмечают, что многие федеральные программы ориентированы на финансирование исключительно крупных инвестиционных объектов, а привлечение средств небольшими населенными пунктами, например,

на решение проблем водоочистки и водоотведения на сегодняшний день затруднено.

Ответы проектантов на вопрос о том, какие из «зеленых» наработок ППС «Карелия» можно было бы использовать в других регионах России, представлены на рис. 4.

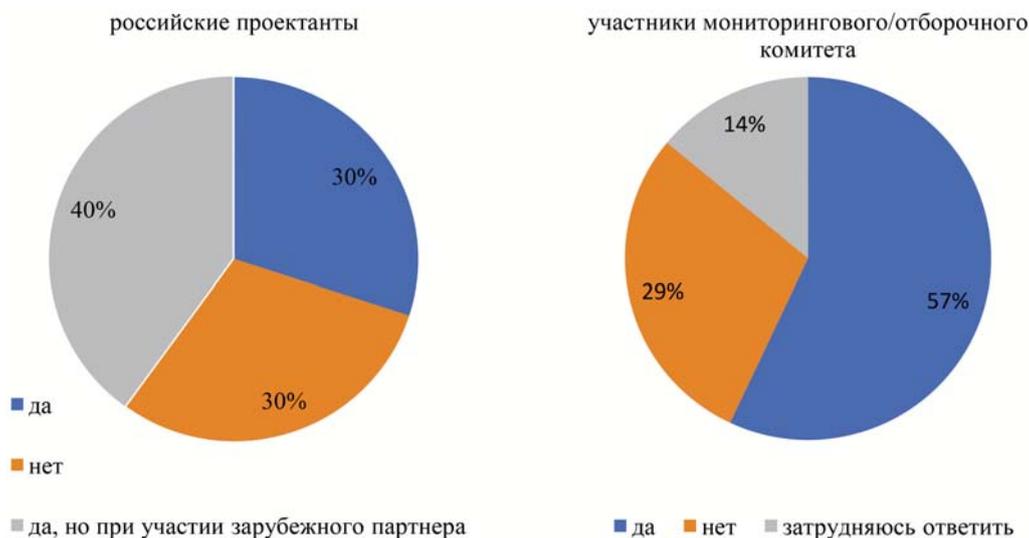


Рис. 3. Ответы на вопрос: Возможно ли было решить локальные экологические проблемы в рамках российских федеральных/региональных программ (без привлечения международного финансирования)?

Fig. 3. Answers to the question: Was it possible to solve local environmental problems through Russian federal/regional programs (without international funding)?



Рис. 4. Ответы на вопрос: Какие из перечисленных наработок можно применять в других российских регионах, не имеющих общей границы с Финляндией?

Fig. 4. Answers to the question: Which of the listed solutions can be applied in other Russian regions that do not have a common border with Finland?

Наиболее перспективным направлением для тиражирования представляется деятельность, связанная с экологическим просвещением. Кроме этого, респондентами отмечено такое направление, как внедрение ресурсо- и энергосберегающих решений, что может быть, с одной стороны, связано с актуальностью этих проблем, а с другой – с относительно простой технической стороной процесса внедрения.

Респонденты не видят существенных препятствий для распространения лучших «зеленых» практик ППС «Карелия». Для этого необходимо информировать региональные/муниципальные органы власти об имеющихся наработках, провести информационный семинар по данному вопросу и/или подготовить соответствующее методическое пособие. Аналогичного взгляда придерживаются представители СМК и СОК. В интервью они отмечают, что при тиражировании наработок стоило бы обратить внимание на: 1) географические и иные специфические особенности территорий, где их предполагается использовать; 2) заинтересованность региональных/местных органов власти в использовании «зеленых» наработок; 3) возможные ограничения действующих норм авторского права. Если с первыми двумя тезисами, безусловно, стоит согласиться, то по поводу последнего пункта необходимо сделать пояснения. Дело в том, что статья 11 общих условий Соглашения о финансировании и реализации программы приграничного сотрудничества «Карелия» на период 2014–2020 годов [2018] предоставляет сторонам, подписавшим документ, право свободно использовать исследовательские наработки, публиковать их и доводить до сведения других сторон. Соответствующее дополнение содержится в грант-контрактах, заключенных по проектам: «Право собственности, а также права промышленной и интеллектуальной собственности на результаты реализации проектов принадлежат партнерам» [Условия..., 2018]. Поэтому российские организации, равно как и зарубежные партнеры, являются полноправными владельцами интеллектуальной и промышленной собственности, полученной в ходе реализации проектов, и препятствий нормативно-правового характера в части тиражирования «зеленых» наработок возникнуть не должно.

Заключение

Изложенные выше данные анализа экологических проектов ППС «Карелия» позволяют сделать ряд выводов и высказать некоторые соображения. Во-первых, для организаций

Республики Карелия участие в ППС «Карелия» стало хорошей школой проектного управления, знакомства с экологической повесткой соседней Финляндии и примером успешного применения передового европейского опыта для решения местных экологических проблем. Ряд «зеленых» наработок были применены и апробированы в условиях арктической зоны Республики Карелия. Наиболее активно новые технологии и инженерно-технические решения применялись в области ресурсосбережения, энергоэффективности, водоснабжения и водоотведения, развития экологического просвещения, улучшения системы утилизации твердых бытовых отходов.

Во-вторых, как в межправительственном Соглашении о финансировании и реализации программы приграничного сотрудничества «Карелия» на период 2014–2020 годов, так и в инструктивных документах управляющего органа программы вопрос интеллектуальных прав на экологические разработки полностью урегулирован и закрепляет за организациями-партнерами права на их использование. Таким образом, результаты нашего изучения данного вопроса свидетельствуют, что юридических препятствий для тиражирования опыта, полученного в ходе реализации экологических проектов ППС «Карелия», нет. Все дело в заинтересованности потенциальных потребителей и учете местной специфики. Поэтому авторы статьи ставят перед собой задачу в ближайшее время подготовить методическое пособие по экологическим проектам программ «Карелия» и «Коларктик», которое смогут использовать в своей практической работе региональные и местные органы власти регионов Арктической зоны России.

В-третьих, исследование показало, что в России сегодня, к сожалению, отсутствуют федеральные программы и проекты, которые бы поддерживали реализацию инициатив в области водоснабжения и водоотведения в малых (10–50 тыс. человек) городах. Поскольку в регионах Арктической зоны России представлены преимущественно небольшие населенные пункты, необходимо предусмотреть появление специального раздела (подраздела) в рамках специализированных российских программ по Арктике.

В-четвертых, основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года (утверждены Указом Президента Российской Федерации № 164 от 05.03.2020) определяют охрану окружающей среды и обеспечение экологической безопасности Арктической зоны России в качестве

одного из стратегических приоритетов государственной политики в регионе. Активное использование наработок экологических проектов программ приграничного сотрудничества Россия-ЕС соответствует поставленным задачам. Поэтому их внедрение способствует формированию «зеленой» экономики в регионе и поможет сохранению уникальной, но весьма уязвимой северной природы.

Литература

Алиев М. Киловатты Солнца: как в Карелии работают «зеленые» технологии // Республика: Информационное агентство [Электронный ресурс]. 2020. URL: <https://rk.karelia.ru/promo/energichnoe-solntse-kak/> (дата обращения: 01.07.2024).

Васильцов В. С., Яшалова Н. Н., Новиков А. В. Климатические и экологические риски развития прибрежных арктических территорий // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 3. С. 341–352. doi: 10.25283/2223-4594-2021-3-341-352

Волков А. Д., Тишков С. В., Каргинова-Губинова В. В., Колесников Н. Г. Экологическое благополучие арктических территорий: соотношение официальных данных и оценок населения (на примере Республики Коми и Архангельской области) // Регион: экономика и социология. 2023. № 2(118). С. 264–301. doi: 10.15372/REG20230211

Завершена модернизация системы централизованного водоснабжения и водоотведения Сортавалы // Карелия: Общественно-политическая газета Республики Карелия [Электронный ресурс]. 2024. URL: https://gazeta-karelia.ru/news/2024/01/zavershena-modernizatsiya-sistemy-tsentralizovannogo-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya-sortavaly/?utm_source=yhnews&utm_medium=desktop&utm_referrer=https%3A%2F%2Fdzen.ru%2Fnews%2Fsearch%3Ftext%3D (дата обращения: 01.07.2024).

Маюско А. А., Матешева А. В. К оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы Арктической зоны в условиях изменяющегося климата в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 1. С. 34–45. doi: 10.25283/2223-4594-2022-1-34-45

На канализационных очистных сооружениях города рассказали, как делают компост из осадка сточных вод // ПКС-Водоканал. Петрозаводск [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://pks-vodokanal.ru/news/8442> (дата обращения: 01.07.2024).

О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад / Минприроды России; МГУ имени М. В. Ломоносова. М., 2023. 686 с.

Решетняк О. С., Коваленко А. А. Комплексное эколого-гидрохимическое районирование материковой части Арктической зоны России в контексте устойчивого развития региона // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 2. С. 234–247. doi: 10.25283/2223-4594-2023-2-234-247

Седнев В. А., Дроздов Д. А., Сергеевкова Н. А. Методы обеспечения экологической безопасности при утилизации отходов в труднодоступных районах

Арктической зоны // Арктика: экология и экономика. 2022. Т. 12, № 3. С. 444–453. doi: 10.25283/2223-4594-2022-3-444-453

Соглашение о финансировании и реализации программы приграничного сотрудничества «Карелия» на период 2014–2020 годов // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс» [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542633725> (дата обращения: 01.07.2024).

Трансграничная система мониторинга окружающей среды (КА5016) // Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [Электронный ресурс]. 2019. URL: https://kareliameteo.ru/o-nas/programma-prigranichnogo-sotrudnichestva-karelija/transgranichnaya_sistema_monitoringa_okruzhayusche/ (дата обращения: 01.07.2024).

Условия, применимые к Грант-контрактам, финансируемым в рамках Программы приграничного сотрудничества Россия-ЕС «Карелия» // Karelia CBC [Электронный ресурс]. 2018. URL: <https://kareliacbc.fi/sites/default/files/assets/images/Conditions%20RU.pdf> (дата обращения: 01.07.2024).

Bohlmann U. M., Koller V. F. ESA and the Arctic – The European Space Agency’s contributions to a sustainable Arctic // Acta Astronautica. 2020. No. 176. P. 33–39. doi: 10.1016/j.actaastro.2020.05.030

Joint Operational Programme 2014–2020 // Karelia CBC [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://www.kareliacbc.fi/sites/default/files/assets/images/Updated%20JOP%20Karelia%20CBC%2019.2.2019.pdf> (дата обращения: 01.07.2024).

Karelia CBC Programme. List of awarded projects // Karelia CBC [Электронный ресурс]. 2023. URL: <https://www.kareliacbc.fi/sites/default/files/assets/Project%20list%20CfP%201-11%20%2B%20LIP%20to%20webpage%20Updated%209.11.2023.pdf> (дата обращения: 01.07.2024).

Li X., Zhu Sh., Li Y., Chang R. What is the asymmetric influence of natural resource rent and green innovation on the ecological sustainability of the ARCTIC region // Resources Policy. 2022. Vol. 79. Art. 103051. doi: 10.1016/j.resourpol.2022.103051

References

Agreement on financing and implementation of the Cross-Border Cooperation Program Karelia for the period 2014–2020. *Elektronnyi fond normativno-tekhnicheskoi i normativno-pravovoi informatsii Konsortsiuma «Kodeks» = Electronic fund of normative, technical, and regulatory information of the Kodeks (Code) Consortium*. 2018. (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/542633725> (accessed: 01.07.2024).

Aliiev M. Kilowatts of the sun: how green technologies work in Karelia. *Respublika = Information Agency ‘Republic of Karelia’*. 2020. (In Russ.). URL: <https://rk.karelia.ru/promo/energichnoe-solntse-kak/> (accessed: 01.07.2024).

Bohlmann U. M., Koller V. F. ESA and the Arctic – The European Space Agency’s contributions to a sustainable Arctic. *Acta Astronautica*. 2020;176:33–39. doi: 10.1016/j.actaastro.2020.05.030

Conditions applicable to grant contracts financed under the Russia-EUCross-Border Cooperation (CBC) Program Karelia. *Karelia CBC*. 2018. (In Russ.). URL: <https://kareliacbc.fi/sites/default/files/assets/images/Conditions%20RU.pdf> (accessed: 01.07.2024).

How compost is made from sewage sludge was explained at the city’s sewage treatment plant. *PKS-Vodokanal. Petrozavodsk*. 2021. (In Russ.). URL: <https://pks-vodokanal.ru/news/8442> (accessed: 01.07.2024).

Joint cross-border environmental monitoring system (KA5016). *Karel'skii tsentr po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy – fil. Federal'nogo gos. byudzh. uchrezhdeniya «Severo-Zapadnoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy» = Karelian Centre for Hydrometeorology and Environmental Monitoring – Branch of the FSBI 'North-Western Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring'*. 2019. (In Russ.). URL: https://kareliameteo.ru/o-nas/programma-prigranichnogogo-sotrudnichestva-karelija/transgranichnaya_sistema_monitoringa_okruzhayusche/ (accessed: 01.07.2024).

Joint Operational Programme 2014–2020. *Karelia CBC*. 2019. URL: <https://www.kareliacbc.fi/sites/default/files/assets/images/Updated%20JOP%20Karelia%20CBC%2019.2.2019.pdf> (accessed: 01.07.2024).

Karelia CBC Programme. List of awarded projects. *Karelia CBC*. 2023. URL: <https://www.kareliacbc.fi/sites/default/files/assets/images/Project%20list%20CfP%201-11%20%2B%20LIP%20to%20webpage%20Updated%209.11.2023.pdf> (accessed: 01.07.2024).

Li X., Zhu Sh., Li Y., Chang R. What is the asymmetric influence of natural resource rent and green innovation on the ecological sustainability of the ARCTIC region. *Resources Policy*. 2022;79:103051. doi: 10.1016/j.resourpol.2022.103051

Makosko A. A., Matesheva A. V. On the assessment of environmental risks from air pollution in the Arctic zone under a changing climate in the XXI century. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and*

Economy. 2022;12(1):34–45. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2022-1-34-45

Modernization of the centralized supply and sanitation system of Sortavala has been completed. *Kareliya: Obshchestvenno-politicheskaya gazeta Respubliki Kareliya = Karelia: Social and political newspaper of the Republic of Karelia*. 2024. (In Russ.). URL: https://gazeta-karelia.ru/news/2024/01/zavershena-modernizatsiya-sistemy-tsentralizovannogo-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya-sortavaly/?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&utm_referrer=https%3A%2F%2Fdzen.ru%2Fnews%2Fsearch%3Ftext%3D (accessed: 01.07.2024).

On the state and protection of the environment in the Russian Federation in 2022. State report. Ministry of Natural Resources and Environment of Russia; Lomonosov Moscow State University. Moscow; 2023. 686 p. (In Russ.)

Reshetnyak O. S., Kovalenko A. A. Comprehensive ecological and hydrochemical zoning of the mainland part of the Russian Arctic zone in the context of the region sustainable development. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2023;13(2):234–247. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2023-2-234-247

Sednev V. A., Drozdov D. A., Sergeenkova N. A. Methods for ensuring environmental safety in waste disposal in hard-to-reach areas of the Arctic zone. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2022;12(3):444–453. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2022-3-444-453

Vasil'tsov V. S., Yashalova N. N., Novikov A. V. Climate and environmental risks in the development of Arctic coastal territories. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(3):341–352. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2021-3-341-352

Volkov A. D., Tishkov S. V., Karginova-Gubino-va V. V., Kolesnikov N. G. Environmental well-being of the Arctic territories: official data vs the public’s views (the cases of the Komi Republic and the Arkhangelsk Region). *Region: ekonomika i sotsiologiya = Region: Economics and Sociology*. 2023;2(118):264–301. (In Russ.). doi: 10.15372/REG20230211

Поступила в редакцию / received: 09.12.2024; принята к публикации / accepted: 13.12.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Базегский Дмитрий Васильевич

канд. ист. наук, руководитель лаборатории комплексного изучения Арктики

e-mail: bazegsky@krc.karelia.ru

Васильева Анастасия Владимировна

канд. экон. наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексного изучения Арктики

e-mail: vasnask@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Bazegsky, Dmitry

Cand. Sci. (Hist.), Head of Laboratory

Vasilieva, Anastasiia

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ И ШКОЛА ДЛЯ МОЛОДЫХ
УЧЕНЫХ «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ
АДАПТАЦИИ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ
УСЛОВИЯМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ СЕВЕРА:
ИССЛЕДОВАНИЯ, ИННОВАЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ»
(Петрозаводск, 9–13 сентября 2024 г.)**



В истории отечественной науки завершающийся 2024 год – особый. Это год 300-летия Российской академии наук. Подготовка к нему шла на протяжении нескольких лет и включала много различных событий и мероприятий, которые проводились как на федеральном, так и на региональном уровне. Не остался в стороне и Институт биологии КарНЦ РАН (ИБ КарНЦ РАН). В частности, в рамках юбилейных мероприятий институтом были организованы Всероссийская научная конференция с международным участием и школа для молодых ученых «Фундаментальные и прикладные аспекты адаптации живых организмов к изменяющимся условиям окружающей среды Севера: исследования,

инновации, перспективы», которые проходили с 9 по 13 сентября 2024 года.

Основная задача конференции – обсуждение современного состояния исследований, последних достижений и тенденций в изучении живых организмов, приспособленных к жизни в условиях Севера.

Работа конференции была организована по четырем направлениям: 1. Экология, физиология и биохимия наземных животных и человека. Механизмы их адаптаций к биотическим и абиотическим факторам среды; 2. Экология, физиология и биохимия водных организмов. Механизмы их адаптаций к биотическим и абиотическим факторам среды; 3. Экология, физиология и биохимия растений. Механизмы их

адаптаций к биотическим и абиотическим факторам среды; 4. Разнообразие и динамика экосистем. Рациональное природопользование на Севере. Биотехнология.

На открытии конференции с приветственным словом выступили и. о. Генерального директора КарНЦ РАН чл.-корр. РАН О. Н. Бахмет, руководитель научного направления КарНЦ РАН акад. РАН Н. Н. Немова, директор ИБ КарНЦ РАН д. б. н. Н. В. Ильмаст. Затем были заслушаны пленарные научные доклады ведущих ученых нашей страны. Д. б. н. Яков Лейзерович Вольперт (Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск) рассказал об адаптации таежных видов мелких млекопитающих к условиям существования в высоких широтах; акад. РАН Нина Николаевна Немова (ИБ КарНЦ РАН, Петрозаводск) познакомила участников конференции с эколого-биохимическими адаптациями гидробионтов Арктики и Субарктики; д. б. н. Алексей Федорович Топунов (Институт биохимии им. А. Н. Баха ФИЦ «Фундаментальные биотехнологии» РАН, Москва) представил доклад о роли гемоглобина в адаптации организмов к условиям внешней среды. В последующие дни конференции с интересными и во многом полезными пленарными докладами выступили также д. б. н. Наталья Юрьевна Феоктистова (Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва), которая рассказала об адаптации грызунов к паразитарной нагрузке в урбоценозах, а д. б. н. Ольга Анатольевна Розенцвет (Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти) изложила современные представления о стратегиях адаптации к засолению растений-галофитов. На секционных заседаниях продолжалось обсуждение вопросов по всем указанным выше научным направлениям. В целом заслушано 88 устных докладов, 23 участника представили стендовые доклады.

Важное место в работе конференции отводилось молодежной школе. Цель ее проведения – привлечение молодых ученых, аспирантов, студентов к изучению и обсуждению вопросов экологии, биотехнологии и рационального природопользования на Севере. Одновременно конференция стала для молодежи хорошей площадкой для знакомства и установления контактов с коллегами, что, безусловно, будет полезным в будущем. Молодые исследователи с большим вниманием прослушали научно-популярные лекции. Так, д. б. н. Олег Васильевич Трапезов (Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск) прочитал лекцию на тему «Дестабилизирующий отбор академика Д. К. Беляева как антитеза к стабилизирующему

отбору И. И. Шмальгаузена»; д. б. н. Римма Германовна Парнова (Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург) посвятила свое выступление роли омега-3 полиненасыщенных жирных кислот для деятельности мозга; д. б. н. Александр Васильевич Бородин (Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург) подробно рассказал о результатах изучения палеоархивов и филогении с точки зрения получения информации об истории формирования биоразнообразия экосистем Арктики и Субарктики; д. б. н. Марина Владимировна Холодова (Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва) говорила в своей лекции о вариативности генотипов прионного белка с различной устойчивостью к болезни хронического изнурения у северных оленей.

На секционных заседаниях молодые исследователи сделали 32 устных доклада, представили 9 постеров. В рамках школы для молодых ученых по каждому направлению проводился конкурс лучших устных молодежных докладов, а также общий по направлениям конкурс стендовых докладов. Победителями конкурса устных докладов, по мнению жюри, куда входили коллеги из разных учреждений Российской Федерации и Беларуси, стали София Владимировна Булычева (Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург), Светлана Николаевна Хуртина (ИБ КарНЦ РАН), Анна Анатольевна Игнатенко (ИБ КарНЦ РАН), Татьяна Игоревна Янченко (ИБ КарНЦ РАН). Победителем среди авторов стендовых докладов стал Михаил Андреевич Родин (ИБ КарНЦ РАН). На церемонии закрытия конференции в торжественной обстановке победителям конкурса докладов молодых ученых были вручены грамоты и памятные подарки.

Конференция показала, что наиболее важные тренды в исследованиях, проводимых ее участниками, связаны с решением основных экологических проблем современности: глобальное изменение климата и возрастание его нестабильности; загрязнение окружающей среды, связанное с действием антропогенных и техногенных факторов; ухудшение состояния водных объектов; снижение плодородия и деградация почв; сохранение биоразнообразия. Поэтому исследования, направленные на изучение влияния неблагоприятных факторов на отдельные живые организмы, популяции и биоценозы в целом, на выявление механизмов адаптации растений, животных и человека к изменяющимся условиям внешней среды, а также оценка и мониторинг видового разнообразия



С пленарными научными докладами и лекциями на конференции выступили ведущие ученые страны Я. Л. Вольперт, Н. Н. Немова, А. Ф. Топунов, А. В. Бородин и другие



Молодые исследователи участвовали в конкурсе на лучший устный и стендовый доклад; награды победителям вручил директор ИБ КарНЦ РАН Н. В. Ильмаст



Спонсоры мероприятия ООО MILLAB и «Лабинструменты» представили информацию об аналитическом и лабораторном оборудовании



не только не утратили своей важности, но и становятся еще более актуальными. Особенно важны такого рода исследования в северных регионах, где восстановление природной среды и биоразнообразия происходит крайне медленно.

Необходимо также отметить, что успешному проведению конференции в немалой степени способствовала поддержка официальных спонсоров: компании MILLAB, специализирующейся на продаже лабораторного и аналитического оборудования, компании по комплексному оснащению лабораторий Helicon и компании «Лабинструменты», занимающейся поставкой лабораторного оборудования, приборов, расходных материалов для науки и производства, а также спонсору конференции – компании Interlab, которая является российским разработчиком и изготовителем аналитического оборудования. В рамках программы конференции представители официальных спонсоров выступили с презентациями о новинках поставляемой ими продукции, рассказали о возможностях и перспективах дальнейшего сотрудничества.

При подведении итогов конференции директор ИБ КарНЦ РАН Николай Викторович Ильмаст отметил широкую географию участников. Свои доклады представили российские исследователи из Архангельска, Екатеринбурга, Иркутска, Кирова, Красноярска, Лабытнанги, Москвы, Мурманска, Новосибирска, Петрозаводска, Рыбачьего, Санкт-Петербурга, Саратова, Сыктывкара, Тобольска, Тольятти, Улан-Удэ, Уфы, Якутска, а также ученые из Беларуси (Минск) и Казахстана (Алматы). В целом в конференции приняли участие более 130 человек



В зале конференции

из 80 научных и образовательных учреждений. В ответном слове участники отметили высокий уровень организации и проведения мероприятия, а также высказали надежду и пожелание придать конференции регулярный характер.

В целом состоявшаяся конференция стала не только важным научным мероприятием, подводящим итоги разноплановых исследований экологической направленности, которые ведутся многие годы в ИБ КарНЦ РАН, а также коллегами из других научных учреждений и вузов, но и внесла заметный вклад в юбилейные мероприятия, проводимые в течение 2024 года в КарНЦ РАН в рамках празднования 300-летия Российской академии наук.

*Н. М. Казнина, А. Ф. Титов.
Фото И. Ю. Георгиевского,
Е. М. Матвеевой, А. А. Игнатенко*

ОБ ИТОГАХ КРУГЛОГО СТОЛА «БРИКС+ КАК ПЛОЩАДКА ДЛЯ НАУЧНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В АРКТИКЕ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВМЕСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»



18–20 сентября 2024 года в г. Петрозаводске на базе КарНЦ РАН состоялась II Международная научно-практическая конференция «Региональное сотрудничество БРИКС: современные проблемы экологии и природопользования». В конференции приняли участие более 200 человек из Белоруссии, Бразилии, Египта, Индии, Китая, России, Эфиопии, ЮАР и тридцати регионов России, что свидетельствует о большом интересе научного сообщества к заявленной теме мероприятия. В ходе пленарного заседания и работы четырех секций заслушано более 100 докладов. Они были посвящены проблемам глобального и регионального изменения климата, развития промышленной экологии и зеленой экономики, изучения водных объектов и наземных экосистем в условиях глобального потепления и антропогенного

воздействия, а также создания особо охраняемых природных территорий. Квинтэссенция высказанных в ходе дискуссий мнений сводится к следующему.

На сегодняшний день назрела необходимость объединения усилий научного и экспертного сообществ стран БРИКС+ в формировании единого понимания существующих экологических проблем и определения унифицированных подходов к рациональному и безопасному природопользованию. Для достижения этой цели участники договорились провести инвентаризацию существующих методик оценки состояния окружающей среды и предложить новые, с тем чтобы в дальнейшем рекомендовать их к использованию всеми странами-участниками. Получило одобрение участников конференции предложение КарНЦ РАН о формировании

экологической платформы БРИКС+, направленной на активизацию многостороннего международного взаимодействия стран-партнеров в научно-практической сфере. Предполагается, что эта база знаний улучшит качество существующих и создаваемых моделей прогноза экологической ситуации, поможет в выработке управленческих решений.

На полях конференции прошли три ассоциированных мероприятия – семинар для молодых ученых и специалистов «Мониторинг пулов и потоков углерода в природных экосистемах», тематическая сессия «Потенциал и международная деятельность НКО в современных условиях при решении задач устойчивого развития территорий» и круглый стол «БРИКС+ как площадка для научного сотрудничества в Арктике: проблемы и перспективы совместных исследований», на итогах которого остановимся подробнее.

Вынесенная в заголовок круглого стола тематика актуальна в свете тех стремительных изменений, которые происходят в мировой политике. В современных условиях отмечается повышенное внимание к Арктике не только северных стран, но и стран глобального Юга. Одним из главных приоритетов стран БРИКС+ является научно-исследовательская работа. Китай, Индия, Бразилия, Саудовская Аравия заинтересованы в арктических научных изысканиях, прежде всего касающихся прогнозирования климата и тех последствий, которые за собой несут климатические изменения. Для России одной из главных задач является охрана окружающей среды и научные изыскания в Арктической зоне. В ходе круглого стола сделана попытка ответить на следующие вопросы. Возможно ли объединение усилий различных игроков в Арктике в интересах изучения региона? Может ли климатическая повестка стать общей для всех стран? Что может предложить Россия из своих научно-практических разработок зарубежным партнерам?

Как показала работа круглого стола, выработка совместной повестки дня в Арктике для стран БРИКС+ находится на самой ранней стадии. Пока лишь некоторые ученые и эксперты идут вперед, пытаясь определить общие подходы. В докладе доцента НИУ ВШЭ И. А. Нестеровой прозвучало предложение о так называемой Полярной повестке, которая могла бы объединить усилия стран по изучению заснеженных территорий Арктики, Антарктики и Гималаев. Данные территории обладают схожими ландшафтами, ледяной покров держится в течение всего года, а экстремальные зимние температуры определяют колебания погоды на большей части Земли.

Идея, конечно, привлекательна с многих точек зрения, но, как продемонстрировало обсуждение, нуждается в дальнейшей доработке.

В ходе круглого стола неоднократно отмечалось, что в сфере научных интересов отечественных исследователей находится не только российская часть Арктики, но и другие арктические страны, прежде всего наши соседи в Северной Европе. Как показал доклад научного сотрудника Кольского научного центра РАН Ю. В. Заики, совместные исследования в Арктике с европейскими коллегами приостановлены в силу геополитических причин. Мониторинг климатических изменений, в котором ранее принимали участие российские ученые, заморожен. По сути, сегодня нет действующих научно-исследовательских проектов и довольно сложно спрогнозировать, когда и как они будут возобновлены.

Старший научный сотрудник ОКНИ КарНЦ РАН А. В. Васильева представила результаты исследования, которое проводится специалистами недавно созданной лаборатории комплексного изучения Арктики в рамках научной темы «Вопросы обеспечения экологической безопасности в Арктике». Выполнена оценка экологических проектов российско-европейских программ приграничного сотрудничества, а также сформулированы выводы относительно перспектив тиражирования этого опыта в Арктической зоне России. Накопленный российскими организациями опыт участия в проектах является одним из передовых на Северо-Западе России. Особый интерес для арктических регионов могут представлять энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии, новые инженерно-технические решения в области водоснабжения и водоотведения в небольших населенных пунктах, методики экологического просвещения населения. Положительная оценка этого исследования прозвучала в выступлении и. о. директора ДОС МИД России И. Н. Капырина. Он поддержал планы по разработке методического пособия по использованию лучших практик приграничного сотрудничества для представителей органов местного самоуправления и региональных органов власти.

В заключение отметим большой интерес к круглому столу: 46 человек приняли участие в обсуждении представленных докладов. Среди участников были не только ученые, но и представители федеральных органов власти, организаций – участников международных проектов, эксперты из Москвы, Санкт-Петербурга, Калининграда, Ленинградской области.

Д. В. Базегский

АЛЕКСАНДР ФЕДОРОВИЧ ТИТОВ (к 75-летию со дня рождения)



22 декабря 2024 года исполняется 75 лет Александру Федоровичу Титову – одному из ведущих отечественных ученых-исследователей в области экологической физиологии растений.

На протяжении более чем 50 лет профессиональной деятельности его основные научные интересы связаны с исследованием механизмов устойчивости и адаптации растений к действию неблагоприятных факторов внешней среды (низкие и высокие температуры,

тяжелые металлы, засоление, аномальные свето-темновые циклы) и роли генетических факторов в этих процессах*. Полученные А. Ф. Титовым за эти годы многочисленные результаты существенно расширили современные представления о природе устойчивости растений, имеют большую научную значимость и важны в практическом отношении. В частности, на них в той или иной степени опираются в своей работе многие генетики и селекционеры, ведущие работу по созданию высокоустойчивых сортов сельскохозяйственных растений. Более 30 лет А. Ф. Титов является руководителем ведущей научной школы России по экологической физиологии растений, получившей официальное признание еще в 1990-е годы. Его исследования на протяжении многих лет постоянно поддерживаются грантами различных международных (INTAS) и российских (РФФИ, РНФ и др.) научных фондов, входят в программы фундаментальных научных исследований Президиума РАН и Отделения биологических наук РАН. Дважды (в 1994–1996 и 2000–2003 гг.) он удостоивался Государственной научной стипендии для выдающихся ученых России.

По материалам исследований А. Ф. Титовым опубликовано (самостоятельно и в соавторстве) более 870 научных работ, в том числе 3 книги, 11 монографий и 11 учебных пособий. Большая часть его научных работ опубликована в ведущих российских и зарубежных журналах биологического профиля. Кроме того,

* Подробная биография А. Ф. Титова и список его основных научных работ за период 1975–2018 гг. представлены в «Трудах Карельского научного центра РАН» № 12 за 2019 г.

он является редактором более 30 монографий, сборников научных статей и трудов научных конференций.

А. Ф. Титов – эксперт широкого профиля: он главный редактор энциклопедии «Карелия» (в 3 томах) и журнала «Труды Карельского научного центра РАН», член редакционных советов и коллегий журналов «Физиология растений», «Ученые записки Петрозаводского государственного университета», «Известия Коми научного центра Уральского отделения РАН», «Принципы экологии», составитель и редактор ряда справочных изданий.

Наряду с активной научно-исследовательской работой А. Ф. Титов постоянно занимается подготовкой научных кадров высшей квалификации. Под его руководством выполнены и успешно защищены 4 докторские и 13 кандидатских диссертаций. На протяжении 24 лет он возглавлял кафедру ботаники и методики преподавания биологии в Карельской государственной педагогической академии. В настоящее время читает курсы «Физиология растений» и «Экологическая физиология растений» в ПетрГУ.

Активную научную и педагогическую работу А. Ф. Титов многие годы успешно сочетал с большой научно-организационной деятельностью: на протяжении 26 лет (с 1991 по 2017 гг.) он возглавлял Карельский научный центр РАН – одно из крупнейших многопрофильных научных учреждений Северо-Запада Российской Федерации. В этот период в КарНЦ РАН сформировались и активно развивались такие научные направления, как изучение ресурсного потенциала лесных, водных, болотных экосистем, разработка методов неистощительного природопользования, исследование биологического разнообразия, экологический мониторинг, изучение минерально-ресурсной базы региона, вопросы истории, культуры и языка коренных народов Карелии, вопросы региональной экономики, а также проблемы международной и межрегиональной интеграции.

Длительное время А. Ф. Титов уделял особое внимание развитию международного сотрудничества, прежде всего с научными организациями и университетами Финляндии, со многими из которых успешно реализовывались договоры о сотрудничестве. Являлся инициатором и активным участником многих международных программ и проектов, научных мероприятий по вопросам природопользования, проблемам охраны окружающей среды и другим актуальным для региона направлениям; был членом Российско-Финляндской рабочей группы

по охране природы при Министерстве природы и экологии Российской Федерации.

Более 10 лет А. Ф. Титов являлся внештатным советником Главы Республики Карелия по вопросам науки и стратегического развития, принимая активное участие в подготовке документов, определяющих стратегию социально-экономического развития региона. В настоящее время он – вице-президент Общества физиологов растений России и председатель Карельского отделения этого общества. В разные годы являлся заместителем председателя Межведомственного Северо-Западного координационного совета при РАН по фундаментальным и прикладным исследованиям, членом Совета по координации деятельности региональных отделений и региональных научных центров РАН, Научного совета РАН по вопросам регионального развития, Совета ректоров Республики Карелия и еще ряда Ученых советов и коллегий министерств Республики Карелия, различных научно-экспертных советов и комиссий, принимая деятельное участие в работе этих органов.

В 2005 году А. Ф. Титов был избран в Общественную палату Российской Федерации первого созыва от Северо-Западного федерального округа и в течение 2006–2007 гг. работал в ней в составе Комиссии по вопросам глобализма и национальной стратегии развития. С 2010 г. он член Общественной палаты Республики Карелия первого созыва и председатель ее Комиссии по образованию и науке. В 2017 г. повторно избран в состав Общественной палаты России (6-го созыва), где работал в составе Комиссии по развитию высшего образования и науки.

Активная научная, научно-организационная, педагогическая и общественная деятельность А. Ф. Титова неоднократно отмечалась государственными и ведомственными наградами, среди которых Орден Почета (2003), Орден Дружбы (2009), Почетная грамота Президента Российской Федерации (2020), почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (1999) и «Почетный работник высшего профессионального образования» (2005), медаль «За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технического развития» (2021), орден «Сампо» (2024), медаль «За заслуги перед Республикой Карелия» (2019), почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Карелия» (1993), нагрудный знак Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Почетный наставник» (2023), ряд юбилейных медалей, многочисленные грамоты и благодарности.

Т. Г. Шibaева

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ ТРУДОВ А. Ф. ТИТОВА ЗА 2019–2024 ГОДЫ

2019. Влияние водного фактора на реакцию растений *Cucumis sativus* L. на кратковременное ежесуточное понижение температуры // Физиология растений. Т. 66, № 3. С. 230–240. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шерудило, Е. Н. Икконен.)

Влияние ежесуточных кратковременных понижений температуры на теплолюбивые и холодостойкие растения // Физиология растений. Т. 66, № 4. С. 266–276. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, Е. Н. Икконен, Е. Г. Шерудило.)

Сравнительное изучение эффектов длительного постоянного и кратковременных ежесуточных воздействий низких температур на основные физиологические процессы растений в условиях подавленного биосинтеза белков // Журнал общей биологии. Т. 80, № 1. С. 57–67. (Совместно с Е. Г. Шерудило, Т. Г. Шibaевой, Е. Н. Икконен.)

Exogenous salicylic acid treatment induces cold tolerance of wheat through promotion of antioxidant enzyme activity and proline accumulation // Acta Physiologiae Plantarum. Vol. 41. Art. 80. (Совместно с А. Ignatenko, V. Talanova, N. Repkina.)

Involvement of proline and non-protein thiols in response to individual and combined low temperature and cadmium stresses in wheat // Biologia Plantarum. Vol. 63, no. 1. P. 70–77. (Совместно с N. Repkina, V. Talanova, A. Ignatenko.)

Способность проростков озимой пшеницы к низкотемпературной адаптации в условиях избыточного содержания цинка в корнеобитаемой среде // Физиология растений. Т. 66, № 5. С. 375–383. (Совместно с Н. М. Казниной, Ю. В. Батовой, Г. Ф. Лайдинен, Е. Г. Шерудило.)

Влияние избытка цинка и низкой температуры на экспрессию гена IRT1 в корнях и листьях ячменя // Доклады Академии наук. Т. 487, № 3. С. 333–337. (Совместно с Н. М. Казниной, Н. С. Репкиной, Ю. В. Батовой.)

Сравнительная оценка эффективности DROP-воздействий и «периодической засухи» как приемов управления ростом растений огурца (*Cucumis sativus* L.) // Сельскохозяйственная биология. Т. 54, № 3. С. 528–537. (Совместно с Т. Г. Шibaевой.)

Карельская береза – уникальный биологический объект // Успехи современной биологии. Т. 139, № 5. С. 412–433. (Совместно с Л. В. Ветчинниковой.)

Влияние дефицита цинка на физиологические процессы и продуктивность культурных

злаков // Успехи современной биологии. Т. 139, № 3. С. 280–291. (Совместно с Н. М. Казниной.)

2020. Реакции растений на кратковременные ежесуточные понижения температуры: феноменология и механизмы // Физиология растений. Т. 67, № 6. С. 599–615. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, Е. Н. Икконен, Е. Г. Шерудило.)

Реакция дыхания проростков озимой пшеницы на продолжительное и кратковременное ежесуточное понижение температуры // Физиология растений. Т. 67, № 3. С. 312–318. (Совместно с Е. Н. Икконен, Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шерудило.)

Влияние свинца на живые организмы // Журнал общей биологии. Т. 81, № 2. С. 147–160. (Совместно с Н. М. Казниной, Т. А. Карапетян, Н. В. Доршаковой.)

Карельская береза: разновидность или самостоятельный вид? // Известия вузов. Лесной журнал. № 1. С. 26–48. (Совместно с Л. В. Ветчинниковой.)

О границах ареала карельской березы // Известия вузов. Лесной журнал. № 6. С. 9–21. (Совместно с Л. В. Ветчинниковой.)

Особенности структуры популяций карельской березы // Успехи современной биологии. № 6. С. 593–608. (Совместно с Л. В. Ветчинниковой.)

2021. Влияние салициловой кислоты на антиоксидантные ферменты и холодоустойчивость растений огурца // Физиология растений. Т. 68, № 3. С. 289–296. (Совместно с А. А. Игнатенко, В. В. Талановой, Н. С. Репкиной.)

Возрастная изменчивость чувствительности листьев томата (*Solanum lycopersicum* L.) к круглосуточному освещению // Физиология растений. Т. 68, № 5. С. 533–543. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, А. В. Мамаевым, Е. Г. Шерудило, Е. Н. Икконен.)

A study of the genetic diversity and differentiation of northern and southern curly birch populations // Russian Journal of Genetics. Vol. 57, no. 4. P. 416–422. (Совместно с L. V. Vetchinnikova, L. V. Topchieva.)

Expression of IRT1 gene in barley seedlings under zinc deficiency at optimal and low temperatures // Acta Agriculturae Slovenica. Vol. 117, no. 4. P. 1–5. (Совместно с N. Kaznina, N. Repkina, Yu. Batova.)

Влияние промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами на растения *Phleum pratense* (Poaceae) в условиях Северной Карелии // Растительные ресурсы. Т. 57, вып. 4. С. 359–369. (Совместно с Г. Ф. Лайдинен, Н. М. Казниной, Ю. В. Батовой.)

Карельская береза: важнейшие результаты и перспективы исследований (монография).

Петрозаводск: КарНЦ РАН. 243 с. (Совместно с Л. В. Ветчинниковой.)

2022. Continuous lighting enhances yield and nutritional value of four genotypes of Brassicaceae microgreens // *Plants*. Vol. 11, no. 2. P. 176. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шеруди́ло, А. А. Рубаевой.)

Effect of zinc deficiency in substrate on growth, photosynthetic apparatus and seed productivity of barley // *Russian Journal of Plant Physiology*. Vol. 69, no. 5. P. 543–550. (Совместно с N. M. Kaznina, Yu. V. Batova, E. S. Kholoptseva.)

Features of wheat adaptation to frost under low-temperature exposure of different intensity // *Russian Journal of Plant Physiology*. Vol. 69, no. 5. P. 551–560. (Совместно с Yu. V. Venzhik, V. V. Talanova, A. A. Ignatenko, N. S. Repkina, E. S. Kholoptseva.)

The role of the photosynthetic daily light integral in plant response to extended photoperiods // *Russian Journal of Plant Physiology*. Vol. 69, no. 7. P. 7–14. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, А. В. Мамаев, Е. Г. Шеруди́ло.)

Effect of continuous lighting on mitochondrial respiration in Solanacea pants // *Russian Journal of Plant Physiology*. Vol. 69. P. 114. (Совместно с E. N. Ikkonen, T. G. Shibaeva, E. N. Sherudilo.)

The HMA2 gene expression in leaves of introgressive wheat lines under Zn optimum and deficiency content in root environment // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. Vol. 505. P. 141–144. (Совместно с N. M. Kaznina, N. I. Dubovets, N. S. Repkina, Yu. V. Batova, A. A. Ignatenko, O. A. Orlovskaya.)

Устойчивость семенного потомства растений из природных популяций *Deschampsia cespitosa* арктической зоны к повышенным концентрациям цинка // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. Т. 27, № 1. С. 70–79. (Совместно с Н. М. Казниной, Г. Ф. Лайдинен, Ю. В. Батовой.)

2023. Влияние метилжасмоната на экспрессию генов, кодирующих ферменты синтеза непротеиновых тиолов, у пшеницы в присутствии кадмия // *Доклады РАН. Науки о жизни*. Т. 509. С. 189–190. (Совместно с Н. С. Репкиной, И. А. Ниловой, Н. М. Казниной.)

Возможные физиологические механизмы фотоповреждения листьев растений в условиях круглосуточного освещения // *Физиология растений*. Т. 70, № 2. С. 148–159. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, А. В. Мамаевым.)

Кратковременные ежесуточные понижения температуры могут нивелировать негативный

эффект круглосуточного освещения на фотосинтетический аппарат растений // *Физиология растений*. Т. 70, № 4. С. 402–409. (Совместно с Е. Н. Икконен, Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шеруди́ло.)

Круглосуточное освещение повышает урожайность и пищевую ценность и снижает содержание нитратов микрозелени семейства Brassicacea // *Физиология растений*. Т. 70, № 6. С. 623–634. (Совместно с А. А. Рубаевой, Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шеруди́ло.)

Влияние аномальных свето-темновых циклов на пигментный комплекс растений семейств Brassicacea и Solanaceae // *Физиология растений*. Т. 71, № 7. С. 801–810. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шеруди́ло, А. А. Рубаевой, И. А. Левкиным.)

Effect of seed treatment with salicylic acid on the carbonic anhydrase activity, photosynthesis rate, stomatal conductance, and pigments content in wheat leaves at zinc excess // *Doklady Biological Sciences*. Vol. 513, no. 1. P. 400–403. (Совместно с А. А. Ignatenko, I. A. Nilova, E. S. Kholoptseva, N. M. Kaznina.)

Род *Betula* L.: популяционно-генетические особенности видов и проблемы таксономии // *Успехи современной биологии*. Т. 143, № 6. С. 603–618. (Совместно с Л. В. Ветчинниковой.)

Влияние хлоридного засоления на проростки ячменя // *Агрехимия*. № 5. С. 70–76. (Совместно с К. Б. Таскиной, Н. М. Казниной.)

2024. Обработка семян салициловой кислотой усиливает экспрессию генов и активность антиоксидантных ферментов в растениях пшеницы при дефиците цинка и меди // *Доклады РАН. Науки о жизни*. Т. 515, № 1. С. 81–86. (Совместно с Н. М. Казниной, Н. С. Репкиной, Н. В. Батовой, А. А. Игнатенко.)

Responses of tomato and eggplant to abnormal light/dark cycles and continuous lighting // *Russian Journal of Plant Physiology*. Vol. 71. P. 12. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, А. В. Мамаев, Е. Г. Шеруди́ло, Е. Н. Икконен.)

Response of native and non-native subarctic plant species to continuous illumination by natural and artificial light // *Plants*. Vol. 13, no. 19. Art. 2742. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шеруди́ло, А. А. Рубаевой, N. Y. Shmakova.)

Effects of extended light/dark cycles on Solanaceae plants // *Plants*. Vol. 13, no. 2. Art. 244. (Совместно с Т. Г. Шibaевой, Е. Г. Шеруди́ло, E. N. Ikkonen, A. A. Rubaeva, I. A. Levkin.)

ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧ ИЕШКО (к 75-летию со дня рождения)

В январе 2025 года исполняется 75 лет Евгению Павловичу Иешко – доктору биологических наук, профессору по специальности «паразитология», профессору кафедры зоологии и экологии Петрозаводского государственного университета, главному научному сотруднику лаборатории паразитологии животных и растений Института биологии Карельского научного центра РАН, заслуженному деятелю науки Российской Федерации и Республики Карелия.

Евгений Павлович родился 10 января 1950 г. в с. Миндерла Сухобузинского района Красноярского края. После школы поступил на биологический факультет Петрозаводского государственного университета, который успешно окончил в 1974 году по специальности «ихтиология». Уже во время учебы в университете Е. П. Иешко увлекся паразитологией, что в дальнейшем и стало главным научным направлением его исследований. По окончании вуза он поступил на работу в лабораторию паразитологии Института биологии КФ АН СССР (КарНЦ РАН), в которой работает на протяжении 50 лет. В 1981 г. Евгений Павлович защитил кандидатскую диссертацию на тему «Опыт эколого-популяционного анализа паразитофауны рыб северных биоценозов», а в 1993 г. – докторскую диссертацию на тему «Популяционная экология паразитов рыб (пространственная структура, распределение численности и роль паразитов в структуре сообщества)». Долгие годы (с 1987 по 2018 г.) Е. П. Иешко руководил лабораторией паразитологии животных и растений. В настоящее время он является главным научным сотрудником этой лаборатории.



Е. П. Иешко – признанный в стране и за рубежом ученый-исследователь в области экологической паразитологии. Основное направление его работ связано с фундаментальными и прикладными аспектами изучения взаимоотношений паразитических организмов с окружающей средой, вопросов специфичности, зоогеографии и эволюции паразитов. Он успешно продолжает учение чл.-корр. АН СССР В. А. Догеля о паразитизме как экологическом

явлении, развивает и углубляет идеи д. б. н. В. Н. Беклемишева и д. б. н. С. С. Шульмана о системном подходе к изучению паразитических организмов, основанном на объединении организменного, популяционного и биоценологического уровней паразито-хозяйственных отношений. Своими исследованиями Евгений Павлович подтверждает тезис о двойственной природе паразитических организмов, изучение которых необходимо проводить не только с точки зрения наносимого ими вреда сельскому, лесному, рыбному и охотничьему хозяйству, но с учетом их важной экологической роли в сообществах живых организмов в естественной среде обитания. Важным этапом работы Евгения Павловича являлась разработка методологических и концептуальных подходов к изучению популяционной экологии паразитов рыб. Он предложил и обосновал гипотезу о роли паразитов в поддержании биологического разнообразия сообществ, а также сформировал представление о пространственной структуре, динамике численности и распределении паразитов в популяциях рыб.

Исследования, проводимые Евгением Павловичем, вносят значительный вклад в решение фундаментальной биологической проблемы адаптации паразитических организмов к изменению факторов окружающей среды. На основании полученных результатов многолетних разноплановых экологических исследований паразитарных систем Е. П. Иешко разработаны и предложены к использованию методы оценки состояния водных и наземных экосистем в северных широтах. Помимо этого, им подробно изучены на популяционном уровне механизмы устойчивости северных водных и наземных паразитарных сообществ к антропогенным воздействиям (загрязнение тяжелыми металлами, аквакультура, эвтрофирование водоемов), которые расширяют представления об адаптивных трендах паразитарных сообществ, о причинах массовых гельминтозов и природно-очаговых заболеваний.

Особое внимание в своей работе Евгений Павлович уделяет проблемам биологических инвазий чужеродных видов животных и их паразитов. Им обнаружено, что вселение новых для водоема видов рыб приводит к существенным изменениям в структуре его рыбного населения и перестройке трофических цепей. Это необходимо учитывать при интродукции новых видов. На примере интродукции моногенеи *Gyrodactylus salaris* и микроспоридии *Glugea hertwigi* – опасных паразитов молоди лосося, форели, семги и других ценных видов промысловых рыб им впервые изучена многолетняя фенология паразитар-

ных эпизоотий, динамика показателей зараженности и влияние паразитов на выживаемость и численность рыб-хозяев. Большое практическое значение в решении задач ветеринарного контроля имеют также исследования паразитов разводимой радужной форели и их потенциальная опасность для аборигенных лососевых рыб.

Е. П. Иешко был одним из ведущих организаторов комплексных исследований по оценке современного состояния и путей сохранения ключевых видов гидробионтов северных рек. При его непосредственном участии проведены научные исследования по договору с Всемирным фондом природы «Резистентность дикой молоди атлантического лосося к заражению моногенами группы *Gyrodactylus salaris*» (2018 г.), по международному проекту «Лососевые виды рыб и пресноводная жемчужница – речные экосистемные услуги и биоразнообразие на территории Зеленого пояса Финноскандии» (2019–2022 гг.), по договорам на выполнение НИР по изучению охраняемых видов лососевых рыб и пресноводной жемчужницы, их состояния и численности в реках на территории заповедника «Костомукшский» и национального парка «Калевальский» (2018–2019 гг.), заповедника «Кивач» (2018–2019 гг.), а также по оценке состояния пресноводной жемчужницы (*Margaritifera margaritifera*) и паразитофауны кумжи (*Salmo trutta*). В последние годы выполнялись работы по паразитологическим исследованиям лососевых рыб рек Мурманской области на территории заповедника «Пасвик» (2022–2023 г.).

Результаты проведенных Е. П. Иешко исследований постоянно публикуются в высокорейтинговых отечественных и международных журналах, что обеспечивает ему широкую известность и признание в научном сообществе. В целом за 50-летний опыт работы в ИБ КарНЦ РАН им самостоятельно и в соавторстве опубликовано более 300 научных работ. Среди них три монографии и три учебных пособия.

Помимо активной научной деятельности Е. П. Иешко уделяет большое внимание подготовке научных кадров. За годы работы в институте под его руководством защищено 9 кандидатских диссертаций. Он регулярно выступает в качестве оппонента при защите кандидатских и докторских диссертаций по биологическим специальностям. Евгений Павлович занимается активной педагогической деятельностью, являясь руководителем выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров Петрозаводского государственного университета.

Научную и педагогическую деятельность Е. П. Иешко успешно сочетает с большой

научно-организационной работой. Долгое время (с 1993 по 2006 г.) он был заместителем Председателя Президиума Карельского научного центра РАН по научной работе и принимал активное участие в разработке региональной целевой программы «Экология и природные ресурсы Республики Карелия». Он руководил комплексными исследовательскими проектами в области экологии и охраны природы Карелии, которые поддерживались международными научными фондами и организациями. Помимо этого, Евгений Павлович проводил большую научно-организационную работу по формированию особо охраняемых природных территорий Республики Карелия. Он также был редактором целого ряда научных изданий Карельского научного центра, возглавлял общественную редакцию «Биология и экология» энциклопедии «Карелия»; входил в состав Рабочей группы по рыбному хозяйству, предусмотренной Меморандумом о взаимопонимании в области развития, мониторинга и научных исследований в сфере рыбного хозяйства в пограничных водных системах стран между Федеральным агентством по рыболовству (Российская Федерация) и Министерством сельского и лесного хозяйства Финляндской Республики.

В настоящее время Евгений Павлович входит в состав редакционных коллегий научных журналов «Паразитология», «Труды Карельского научного центра РАН» (серия «Биогеография»), «Принципы экологии». Являясь вице-президентом Паразитологического общества РАН, он принимает активное участие в его работе, организации и проведении научных конференций международного уровня по проблемам общей паразитологии, ихтиологии и экологии, съездов и совещаний общества.

Активная научная, научно-организационная, педагогическая и общественная деятельность Е. П. Иешко неоднократно отмечена государственными наградами и знаками отличия, среди которых: Почетная грамота Совета министров Карельской АССР (1993 г.); почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Карелия» (2000 г.); Почетная грамота Российской академии наук и Профсоюза РАН (2004 г.); звание «Лауреат Республики Карелия 2009 года», почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (2010 г.); Почетная грамота Российской академии наук (2013 г.); медаль «За заслуги перед Республикой Карелия» (2020 г.).

От всей души поздравляем Евгения Павловича с юбилеем, желаем крепкого здоровья, творческих успехов и новых научных открытий!

Е. М. Матвеева, Н. М. Казнина

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ Е. П. ИЕШКО

1983. Экологический анализ паразитов сиговых рыб. Л.: Наука. 168 с. (Совместно с Л. В. Аникиевой, Р. П. Малаховой.)

1988. Популяционная биология гельминтов рыб. Л.: Наука. 118 с.

1997. Паразиты рыб водоемов Карелии: Систематический каталог. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 120 с. (Совместно с Е. А. Румянцевым.)

2007. Методы сбора и изучения гельминтов мелких млекопитающих. Учебное пособие. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 145 с. (Совместно с В. С. Аникановой, С. В. Бугмыриным.)

2008. Паразиты лососевидных рыб Фенноскандии: Учебное пособие. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 168 с. (Совместно с Ю. Ю. Барской, Д. И. Лебедевой.)

2011. Краткий спецкурс по нематологии. Учебно-методическое пособие. Петрозаводск: ПИН. 84 с. (Ред. совместно с Е. М. Матвеевой, А. А. Суцук.)

2019. Сукцессия паразитофауны сиговых рыб при антропогенном эвтрофировании Сямозера // Паразитология. Т. 53(4). С. 283–293. (Совместно с Л. В. Аникиевой.)

Видовое богатство сообществ паразитов ротана *Percottus glenii* (Actinopterygii: Odontobutidae) в нативной и приобретенной частях ареала хозяина // Паразитология. Т. 53(2). С. 145–158. (Совместно с А. В. Коросовым, С. Г. Соколовым.)

Correction to: First data on the parasite fauna of daubed shanny *Leptoclinus maculatus* (Fries 1838) (Actinopterygii, Perciformes: Stichaeidae) in Svalbard waters // Polar Biology. Vol. 42(4). P. 831–834. (Совместно с S. A. Murzina, S. G. Sokolov, S. N. Pekkoeva, N. N. Nemova, R. Kristoffersen, S. Falk-Petersen.)

Morphology and phylogeny of *Henneguya oviperda* infecting oocytes of *Esox lucius*, with description of parasite-induced histopathology // Diseases of Aquatic Organisms. Vol. 133(2). P. 91–98. (Совместно с S. G. Sokolov, D. I. Lebedeva, S. A. Murzina, A. N. Parshukov, K. A. Bystrova.)

Quantification of mantle attachment scars on the *Margaritifera margaritifera* (Margaritiferidae, Bivalvia) shell // Arctic Environmental Research. Vol. 2. P. 81–86. (Совместно с А. А. Zotin.)

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, С. Г. Соколовым, Н. В. Ильмастом.)

Связь видового богатства сообществ гельминтов и численности хозяина (на примере обыкновенной буроzubки *Sorex araneus*) // Паразитология. Т. 54(1). С. 3–12. (Совместно с А. В. Коросовым, И. А. Никоноровой, С. В. Бугмыриным.)

Growth parameters of the freshwater pearl mussel *Margaritifera margaritifera* (Bivalvia, Margaritiferidae). Vuokinjoki river population (Karelia) // Malacologia. Vol. 63(1). P. 67–75. (Совместно с А. А. Zotin, S. A. Murzina, K. A. Filippova.)

2021. Parasite counts or parasite incidences? Testing differences with four analyses of infra-community modelling for seven parasite-host associations // Parasitology Research. Vol. 120(7). P. 2569–2584. (Совместно с В. R. Krasnov, A. Spickett, K. Junker, S. V. Bugmyrin, L. A. Bespyatova, M. Stanko, I. S. Khokhlova, S. Matthee.)

Morphological and molecular differentiation of *Diplostomum* spp. metacercariae from brain of minnows (*Phoxinus phoxinus* L.) in four populations of northern Europe and East Asia // Infection, Genetics and Evolution. Vol. 92. Art. 104911. (Совместно с D. I. Lebedeva, G. G. Chrisanova, A. S. Guliaev, G. A. Yakovleva, B. Mendsaikhan, S. K. Semyenova.)

Parasitic copepods *Caligus lacustris* (Copepoda: Caligidae) on the rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in cage aquaculture: morphology, population demography, and first insights into phylogenetic relationships // Parasitology Research. Vol. 120(7). P. 2455–2467. (Совместно с А. Parshukov, P. Vlasenko, E. Simonov, T. Burdukovskaya, L. Anikieva, E. Kashinskaya, K. B. Andree, M. Solovyev.)

2022. The Structure of Parasite Communities in the European Perch (*Perca fluviatilis* L.) in the Initial Period of the Formation of Boguchanskoe Reservoir // Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Vol. 49. P. 225–233. (Совместно с Yu. K. Chugunova.)

Ульцеративный дермальный некроз лососевых: обзор // Журнал общей биологии. Т. 83(2). С. 138–148. (Совместно с Д. С. Провоторовым, С. А. Мурзиной, Н. Н. Немовой.)

Biological Invasions: European Smelt *Osmerus eperlanus* (L.) and Microsporidium *Glugea hertwigi* Weissenberg, 1911 // Russian Journal of Biological Invasions. Vol. 13(1). P. 1–10. (Совместно с L. V. Anikieva, O. P. Sterligova, Yu. S. Reshetnikov.)

Postglacial Expansion Routes and Mitochondrial Genetic Diversification of the Freshwater Pearl Mussel in Europe and North America // Diversity. Vol. 14. Art. 477. (Совместно с I. V. Vikhrev, A. V. Kondakov, N. S. Mugue, G. V. Bovykina, D. A. Efremov, A. G. Bulakhov, A. A. Tomilova, O. A. Yunitsyna, I. N. Bolotov.)

2023. Phenotypic Diversity of Population Groupings of *Proteocephalus longicollis* (Zeder 1800) (Cestoda: Proteocephalidae), a Parasite of *Coregonus lavaretus* (L.) Whitefish // Biology Bulletin Reviews. Vol. 13(S2). P. 199–206. (Совместно с L. V. Anikieva.)

Zn, Cu, Ni, Cd, and Pb in the foot tissue of freshwater pearl mussels from Green Belt rivers of Fennoscandia // Toxicological & Environmental Chemistry. Vol. 105(9). P. 1–29. (Совместно с S. A. Murzina, S. N. Khurtina, K. M. Nikerova, D. A. Efremov, M. A. Ruch'yov, A. N. Parshukov, S. G. Sokolov, N. S. Repkina, N. V. Polikarpova, P. M. Terentjev, S. S. Sandimirov, D. S. Bernadskaya.)

Effect of low-temperature exposure of the wild potato *Solanum commersonii* Dun. and its genotypes on infection by the potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* Woll. // Russian Journal of Nematology. Vol. 31(1). P. 59–67. (Совместно с E. M. Matveeva, V. V. Gorbach.)

Parasites of invasive pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792) (Actinopterygii: Salmonidae), in the Kandalaksha Bay of the White Sea // Polar Biology. Vol. 47(1). P. 1–13. (Совместно с S. Sokolov, N. Gordeeva, V. Gorbach, A. Parshukov.)

Resurrection of *Diplostomum numericum* Niewiadomska, 1988 (Digenea, Diplostomatoidea: Diplostomidae) Based on Novel Molecular Data from the Type-Host. *Diversity*. Vol. 15. Art. 840. (Совместно с S. G. Sokolov, D. I. Lebedeva.)

Loss of species and genetic diversity during colonization: Insights from acanthocephalan parasites in northern European seals // Ecology and Evolution. Vol. 13. e10608. (Совместно с L. Sromek, E. Yinen, M. Kunnasranta, S. N. Maduna, T. Sinisalo, C. T. Mitchell, K. M. Kovacs, C. Lydersen, E. Andrievskaya, V. Alexeev, S. Leidenberger, S. B. Hagen, T. Nyman.)

2024. Parasite abundance distribution as a model of host-parasite relationships between monogeneans *Gyrodactylus* spp. and cage-reared rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* // Parasitology Research. Vol. 123. Art. 329. (Совместно с V. A. Gorbach, A. N. Parshukov.)

Specific features of parasite communities of Siberian cisco *Coregonus sardinella* in polytypic water bodies of the polar regions: species richness // Parasitology Research. Vol. 123. Art. 98. (Совместно с J. K. Chugunova, V. V. Gorbach, K. V. Polyayeva.)

Conservation genetic units under future climate change scenarios: a case of the threatened freshwater pearl mussel (*Margaritifera margaritifera*) // Journal Biodiversity and Conservation. doi: 10.1007/s10531-024-02959-x (Совместно с I. V. Vikhrev, R. Kuehn, Ju. Geist, A. V. Kondakov, O. A. Chelpanovskaya, I. N. Bolotov.)

СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ КОМУЛАЙНЕН (к 75-летию со дня рождения)

24 января 2025 г. исполняется 75 лет Сергею Федоровичу Комулайнену, одному из признанных специалистов в области гидробиологии и экологии рек, доктору биологических наук, ведущему научному сотруднику лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных Института биологии КарНЦ РАН.

Сергей Федорович родился в 1950 г. в Петрозаводске. Первый опыт научной работы он приобрел после школы, работая лаборантом в лаборатории мелиорации Института биологии КФ АН СССР. Высшее образование получил в Петрозаводском государственном университете (1970–1975 гг.), куда поступил после службы в армии. Еще во время учебы Сергей Федорович принял участие в комплексных работах по изучению лососевых нерестовых рек Карелии, проводимых в лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных ИБ КФ АН СССР. За этот период он собрал значительный объем материалов по высшей водной растительности и перифитону лососевых рек бассейна Онежского озера, на основе которых в дальнейшем были подготовлены его курсовая и дипломная работы. Результаты исследований вошли в монографию «Лососевые нерестовые реки Онежского озера» (1978).

После окончания Петрозаводского государственного университета по специальности «биология» в 1975 г. он поступил на работу в Институт биологии КФ АН СССР (ныне ИБ КарНЦ РАН). С первых дней работы в институте в лаборатории ихтиологии, которая в 1980 г. была переименована в лабораторию экологии рыб и водных беспозвоночных, он активно включился в реализацию комплексной программы



по изучению естественного воспроизводства атлантического лосося в реках Карелии и Кольского полуострова. Сергей Федорович постоянно совершенствовал свои профессиональные навыки: проходил стажировку у ведущих специалистов в Институте озераведения РАН (г. Санкт-Петербург), в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), в Институте NIVA (Норвегия, грант Совета министров Северных Стран, 1997 г.), в университете г. Уппсала (Швеция, грант VISBY, 2002 г.).

За время работы в Институте биологии он прошел все ступени научной карьеры от лаборанта до ведущего научного сотрудника.

В 2002 г. С. Ф. Комулайнен защитил кандидатскую диссертацию на тему «Формирование структуры фитоперифитона рек Карелии», а уже через три года (в 2005 г.) – докторскую диссертацию на тему «Структура и функционирование фитоперифитона в малых реках Восточной Фенноскандии» (ЗИН РАН, г. Санкт-Петербург). Ему удалось собрать и проанализировать обширные и совершенно новые для науки материалы по фитоперифитону рек, расположенных на территории от Северного побережья Ладожского озера до Баренцева моря. Впервые применительно к водоемам Восточной Фенноскандии он разработал оригинальные методы изучения и анализа альгоценозов перифитона как части экосистем при мониторинге на водотоках по совокупности показателей (таксономический состав, разнообразие, эколого-географические спектры, обилие), оценив правомерность их использования в тех или иных условиях. Используя современные гидробиологические методики и авторские разработки, он впервые представил данные о видовом составе и уровне развития фитоперифитона в многочисленных реках Восточной Фенноскандии (Республика Карелия, Финская Лапландия, Вологодская, Ленинградская и Мурманская области). Выполнил большой объем работ по сравнительному таксономическому и эколого-географическому анализу их альгофлоры с оценкой уровня биомассы и первичной продукции фитоперифитона, показал роль природных условий в водотоках в развитии антропогенных процессов и их влияние на структуру фитоперифитона. Важным итогом его научно-исследовательской работы явились публикации монографий «Экология фитоперифитона малых рек Восточной Фенноскандии» (2004); «Альгофлора озер и рек Карелии» (2006); «Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии» (2015), которые вызвали значительный научный интерес и широко цитируются в работах специалистов – альгологов, экологов и гидробиологов. Полученные результаты исследований являются важными для разработки целостной теории структуры и функционирования водных экосистем и при создании научных основ мониторинга и прогнозирования антропогенных нагрузок на экосистемы малых рек.

С. Ф. Комулайнен установил и поддерживает тесные партнерские отношения с ведущими учеными России, стран ближнего и дальнего зарубежья, которые способствовали

повышению уровня проводимых исследований, расширению их тематики и совершенствованию методической основы. Он постоянно получает финансовую поддержку в виде грантов государственных научно-технических программ, РФФИ, программ фундаментальных исследований Президиума РАН, ОБН РАН, программ ФЦНТП («Биоразнообразие»), региональных программ Министерства сельского, рыбного и охотничьего хозяйства РК и Ассоциации форелеводов РК.

Сергей Федорович участвовал в выполнении международных проектов, направленных на изучение водорослевых сообществ речных экосистем бореальных и умеренных зон Европы (Венгрия, Польша, Финляндия, Швеция, Норвегия), принимал участие в комплексных научных исследованиях, осуществляемых в рамках проектов по приграничному сотрудничеству (Финляндия). Результаты последнего проекта использовались при подготовке научных обоснований для создания особо охраняемых природных территорий в Карелии.

Он также является постоянным участником всероссийских и международных научных симпозиумов, съездов и конференций. Неоднократно выступал в качестве преподавателя с тематикой по диатомовым водорослям и перифитону водоемов перед студентами ПетрГУ, на российских (Сыктывкар, Борок, Ростов-на-Дону) и международных (Швеция, Белоруссия, Финляндия) научных школах.

В настоящее время Сергей Федорович продолжает активную многоплановую работу по изучению фитоперифитона рек Восточной Фенноскандии. За период научной деятельности им опубликовано более 300 печатных работ, включая 8 монографий, статьи в международных и центральных российских журналах, в сборниках трудов различных научных учреждений, материалах конференций. Результаты его многолетних исследований зарегистрированы в 14 базах данных.

С. Ф. Комулайнен участвует в общественной жизни научного сообщества. Является членом Ботанического и Гидробиологического обществ при РАН и входит в редакционные коллегии журналов «Альгология» и «Труды Карельского научного центра РАН» (серии «Биогеография» и «Лимнология и океанология»).

В 2020 г. он выступил в качестве научного консультанта диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук И. А. Барышева по специальности «гидробиология».

За научные достижения С. Ф. Комулайнену в 2020 г. было присвоено звание «Заслуженный

деятель науки Республики Карелия», он награжден Почетными грамотами Российской академии наук, Профсоюза работников РАН, Президиума Карельского научного центра РАН, медалью «Ветеран труда Российской Федерации».

Искренне поздравляем Сергея Федоровича с юбилеем и желаем ему крепкого здоровья, успехов в реализации намеченных планов и творческого долголетия.

*О. П. Стерлигова, И. А. Барышев,
Н. В. Ильмаст*

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ С. Ф. КОМУЛАЙНЕНА

1978. Водная и прибрежная растительность притоков Онежского озера // Лососевые нерестовые реки Онежского озера. Л.: Наука. С. 14–31.

1985. Оборудование для изучения перифитона в потоке // Гидробиологический журнал. Т. 21, № 2. С. 96–97. (Совместно с Ю. А. Смирновым.)

1988. Reproduction of coregonids in eutrophicated Lake Syamozero (Karelia) // Finnish Fisheries Research. No. 9. P. 485–488. (Совместно с О. П. Стерлиговой, С. А. Павловским.)

1989. Методические рекомендации по изучению гидробиологического режима малых рек. Петрозаводск: Карел. науч. центр АН СССР. 41 с. (Совместно с А. Н. Кругловой, В. В. Хренниковым, В. А. Широковым.)

1990. Макрофиты в малых реках Карелии и Кольского полуострова // Гидробиологический журнал. № 75. 22 с.

1991. Реакция речного перифитона на изменение трофности проточных озер // Антропогенные изменения экосистем малых озер. СПб.: Гидрометеоздат. С. 283–286.

1993. Питание беспозвоночных эпилитона в небольшой реке // Проблемы лососевых на Европейском Севере. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. С. 89–105. (Совместно с В. В. Хренниковым.)

1995. Перифитон реки Кенти // Влияние техногенных вод горно-обогатительного комбината на водоемы системы реки Кенти. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. С. 47–60.

1996. Перифитон рек Ленинградской, Мурманской областей и Республики Карелия. Опер.-информ. мат.-лы. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 39 с.

1998. Climate changes and some peculiarities of periphyton development in streams // Climate and waters. Helsinki, Finland. P. 527–532.

1999. Формирование и функционирование фитоперифитона в реках. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 50 с.

2001. Effect of the trout farm on the lake-river ecosystem of the salmon river Lishma // Ecohydrology & Hydrobiology. No. 1. P. 219–228. (Совместно с О. П. Sterligova, S. A. Pavlovsky, I. L. Shchurov, N. V. Ilmast, Ya. A. Kuchko.)

2002. Features of periphyton in some rivers of north-western Russia. Stuttgart // Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie. Vol. 27(5). P. 3159–3161.

Use of periphyton for monitoring in rivers in Northwest Russia // Journal of Applied Phycology. Vol. 14. P. 57–62.

2003. Методические рекомендации по изучению фитоперифитона в малых реках. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 43 с.

Оценка влияния форелевой фермы на озерно-речную систему реки Лижма (бассейн Онежского озера) // Биология внутренних вод. № 2. С. 92–99. (Совместно с С. П. Китаевым, О. П. Стерлиговой, С. А. Павловским, Я. А. Кучко.)

Algae cenosis biodiversity formation in the North Russian rivers // The Finnish Environment. Vol. 485. Vantaa, Finland. P. 170–174.

2004. Фитоперифитон рек Республики Карелия // Ботанический журнал. Т. 89, № 3. С. 18–35.

Experience of using phytoperiphyton monitoring in urban watercourses // Oceanological and Hydrobiological Studies. Vol. 33(1). P. 65–75.

Экология фитоперифитона малых рек Восточной Фенноскандии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 182 с.

2006. Питание беспозвоночных перифитона в небольшой реке // Экология. № 5. С. 372–378.

Библиография работ по водорослям Европейского Севера России (Республика Карелия, Мурманская область). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 66 с. (Совместно с Г. А. Антипиной, И. Г. Вислянской, Т. А. Иешко, Г. Ц. Лаком, Т. А. Чекрыжевой, А. Н. Шаровым, Т. С. Шелеховой.)

Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 78 с. (Совместно с Т. А. Чекрыжевой, И. Г. Вислянской.)

2007. Short- and long-term changes in phytoperiphyton structure and production in small streams of Eastern Fennoscandia // Oceanological and Hydrobiological Studies. Vol. 36(1). P. 189–198.

Влияние ландшафта на особенности структуры фитоперифитона малых рек Восточной Фенноскандии // Биология внутренних вод. № 1. P. 55–60.

Algological studies of fluvio-lacustrine systems in the northern European part of Russia // *International Journal on Algae*. Vol. 9(2). P. 139–149.

Spatial and temporal variation of heavy metal levels in phytoplankton in small streams of Northwest Russia // *Archiv für Hydrobiologie*. Suppl. 161(3-4). P. 435–442. (Совместно с А. К. Морозов.)

2008. Материалы к флоре Bacillariophyta водоемов Карелии. IV. Реки Карельского побережья Белого моря // *Ботанический журнал*. № 93(3). С. 393–398. (Совместно с С. И. Генкалом.)

Phytoplankton community structure and distribution in the Teno River and its tributaries (Finnish Lapland) // *Boreal Environment Research*. Vol. 13. P. 517–524.

Green algae as structural element of phytoplankton communities in streams of NW Russia // *Biologia*. Vol. 63(6). P. 859–865.

2009. Diatoms of periphyton assemblages of small rivers in North-Western Russia // *Studi Trentini di Scienze Naturali*. Vol. 84. P. 153–160.

2011. Состояние заливов Онежского озера при товарном выращивании радужной форели // *Поволжский экологический журнал*. № 3. С. 386–393. (Совместно с О. П. Стерлиговой, С. П. Китаевым, Н. В. Ильмастом, Я. А. Кучко, С. А. Павловским.)

2013. Response of algal communities to anthropogenic changes in mineralization // *Botanica Lithuanica*. Vol. 19(1). P. 57–66. (Совместно с Т. А. Чекрызьева.)

Структура сообществ водных организмов притоков Выгозерского водохранилища // *Поволжский экологический журнал*. № 3. С. 261–270. (Совместно с А. Н. Кругловой, И. А. Барышевым.)

2014. Фитоперифитон в водоемах г. Петрозаводска (Республика Карелия) // *Труды Карельского научного центра РАН*. № 2. С. 43–50.

2015. К флоре Bacillariophyta рек бассейна Онежского озера // *Ботанический журнал*. № 100(1). P. 21–33. (Совместно с С. И. Генкалом.)

2016. Assessing the Environmental Conditions of Rivers on the Northern Coast of Lake Ladoga by Chemical Characteristics and the Structure of Hydrobiocenoses // *Water Resources*.

Vol. 43(3). P. 486–494. (Совместно с Р. А. Лозовик, А. Н. Круглова, И. А. Барышев, Н. А. Галибина.)

2018. Structure and dynamics of algal communities in small river of the Republic of Karelia (Russia) // *Botanica*. Vol. 24(1). P. 59–68.

Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН. 127 с. (Совместно с О. П. Стерлиговой, Н. В. Ильмастом, Я. А. Кучко, Е. С. Савосиним и И. А. Барышевым.)

2019. Phytoplankton of the Kem River and Its Tributaries (Republic of Karelia, Russia) // *International Journal on Algae*. Vol. 21(2). P. 123–136.

2020. Диатомовые водоросли льда и подледной воды некоторых озер Карелии // *Ботанический журнал*. Т. 105, № 2. С. 55–64. (Совместно с С. И. Генкалом.)

2021. Диатомовые в альгоценозах малых озер (ламб) в Республике Карелия // *Ботанический журнал*. № 106(5). С. 460–473. (Совместно с С. И. Генкалом, Т. С. Шелеховой.)

Питание европейской жемчужницы *Margaritifera margaritifera* в небольшой реке (Республика Карелия, Россия) // *Труды ЗИН РАН*. № 325(4). С. 505–515.

2023. Фитоперифитон водотоков северного побережья Онежского озера // *Вопросы современной альгологии*. № 1(31). С. 88–95.

Диатомовые водоросли в альгоценозах озера Пизанец (Республика Карелия) // *Ботанический журнал*. Т. 108, № 6. С. 534–546. (Совместно с С. И. Генкалом.)

2024. Структура и динамика гидробиоценозов (фитоперифитон, зоопланктон, зообентос) рек карельского побережья Белого моря // *Труды Кольского научного центра РАН*. Т. 3, № 1. С. 104–115. (Совместно с И. А. Барышевым.)

О морфологической изменчивости диатомовой водоросли *Karayevia suchlandtii* (Bacillariophyta) // *Труды ИБВВ РАН*. Вып. 105(108). С. 24–28. (Совместно с С. И. Генкалом.)

Исследование *Fragilaria pararumpens* (Bacillariophyta) – редкого для России вида диатомовой водоросли // *Новости систематики низших растений*. № 58(2). С. 1–12. (Совместно с С. И. Генкалом, М. А. Гололобовой.)

ПАМЯТИ НИКОЛАЯ ВАСИЛЬЕВИЧА ЛАПШИНА (1946–2024)

На 77-м году после долгой и изнурительной болезни ушел из жизни Николай Васильевич Лапшин – выдающийся орнитолог, доктор биологических наук, друг, коллега и наставник нескольких поколений исследователей.

Николай Васильевич родился 8 октября 1946 г. в поселке Бурмакино Некрасовского района Ярославской области. В 1970 г. он окончил биолого-почвенный факультет Ленинградского государственного университета. Здесь под влиянием известного орнитолога, профессора Александра Сергеевича Мальчевского сформировались его научные интересы и определилась дальнейшая судьба замечательного полевого исследователя и выдающегося ученого. После завершения учебы и службы в армии он всю профессиональную жизнь посвятил работе в Институте биологии Карельского научного центра РАН, где работал в лаборатории зоологии, в орнитологической группе, возглавляемой Владимиром Борисовичем Зиминим.

Основным направлением научной деятельности Николая Васильевича стало изучение миграции, размножения и линьки воробьиных птиц, а также особенностей их годовых циклов на севере ареала. В 1981 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Годовой цикл (размножение, линька и миграции) пеночки-веснички и его адаптивные особенности в условиях таежного Северо-Запада РСФСР». Спустя еще 20 лет непрерывной работы и сбора колоссального объема данных в 2001 г. Николай Васильевич защитил докторскую диссертацию на тему «Годовые циклы дальних трансконтинентальных мигрантов на примере воробьиных птиц рода *Phylloscopus*».

На протяжении всей научной карьеры Николая Васильевича пеночки оставались его любимыми объектами. Именно им был посвящен каждый полевой сезон, который Николай Васильевич неизменно проводил в лесах.



В студенческие годы он собирал материал для дипломной работы на островах Ладожского озера, в начальный период своей научной карьеры работал в Прионежье на Шокшинском стационаре КФ АН СССР, большую часть своих исследований провел на берегу Ладожского озера на стационаре ИБ КарНЦ РАН «Маячино», а в последние годы жизни работал на Ладожской орнитологической станции. Помимо этого, несколько сезонов Николай Васильевич изучал пеночек на Кольском полуострове, в Себежском национальном парке в Псковской области и в Смольном национальном парке в Мордовии.

В круг его научных интересов входили и фаунистические исследования. На протяжении всей жизни он активно изучал орнитофауну Карелии и других регионов, в которых ему удалось побывать, а также миграции птиц разных видов. Фаунистические работы Николая Васильевича охватывали разные районы Карелии, Ленинградской и Архангельской областей, он неоднократно участвовал в экспедициях по обследованию акватории и островов Ладожского и Онежского озер и Белого моря. Довелось Николаю Васильевичу поработать и в Прибайкалье.

Основная работа по изучению миграций проведена в ходе массовых отловов птиц на Ладожской орнитологической станции и на стационаре «Маячино». Тысячи птиц были окольцованы Николаем Васильевичем, тысячи часов провел он, проверяя линии сетей и специальные большие ловушки. Не менее важными для него были и начатые в 1990-х годах многолетние исследования по оценке состояния популяций гусеобразных птиц на миграционных стоянках на Олонецкой равнине, которые позволили разработать и обосновать необходимые меры по их охране и рациональному использованию.

Несмотря на прогрессирующую болезнь, Николай Васильевич продолжал выезжать на учеты птиц на Олонецкие поля, участвовал в отлове и кольцевании птиц на Ладожской орнитологической станции, помогал ставить большие ловушки рыбачинского типа, активно искал гнезда птиц и участвовал в бытовых работах. Не пугали его ни плохие дороги, ни гнус, ни жара, ни холод, всегда хотелось после долгой зимы скорее вернуться к любимой полевой работе в уже давно родной лес, такие знакомые поля... Только в последний год здоровье значительно подвело, и он впервые не смог выехать из города, а в самый пик гнездования птиц тихо ушел из жизни.

Благодаря своей активной научной деятельности Николай Васильевич запомнился нам как выдающийся специалист в области популяционной экологии птиц. В последние десятилетия наука стремительно развивалась, и Николай Васильевич старался не отставать от ее перспективных направлений. Он одним из первых ученых института начал работать на компьютере, вместе с коллегами освоил новые методы молекулярной биологии и успешно сочетал их с традиционными методами зоологических исследований. За годы его жизни сменился язык науки – статьи стали писать не на немецком, а на английском языке, пришлось осваивать и новый язык. Он всегда активно сотрудничал с российскими и зарубежными коллегами,

поддерживая обмен опытом и знаниями в области орнитологии и экологии.

Николай Васильевич опубликовал более 300 научных трудов, включая статьи и коллективные монографии. Среди наиболее значимых его работ хочется отметить участие в написании таких масштабных монографий, как «Линька воробьиных птиц Северо-Запада СССР» (1990), «Орнитофауна Карелии» (1995), «Красная книга Карелии» (2007), «Олонецкие весенние скопления птиц. Гуси» (2007), «Миграции птиц Северо-Запада России. Неворобьиные» (2016), «Миграции птиц Северо-Запада России. Воробьиные» (2020). Под его руководством защищены две кандидатские диссертации, он руководил проектами РФФИ и РНФ, развивал новые направления исследований, рецензировал научные статьи, готовил отзывы на авторефераты и тексты кандидатских и докторских диссертаций, руководил подготовкой выпускных квалификационных работ студентов. В 2011–2015 годах был членом диссертационного совета Д 212.190.01 при Петрозаводском государственном университете. Активно участвовал в работе Мензбирова орнитологического общества, Русского общества сохранения и изучения птиц имени М. А. Мензбира, Союза охраны птиц России, Рабочей группы по Гусеобразным Северной Евразии.

За плодотворную научную и общественную деятельность Николай Васильевич награжден Почетной грамотой профсоюза работников РАН, Почетной грамотой РАН и Почетной грамотой Центрального совета Всероссийского общества охраны природы, а в 2021 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Карелия».

При этом Николай Васильевич всегда оставался простым в общении, доброжелательным, много знающим и охотно делящимся своими знаниями человеком. Всегда разговорчивый и живой в общении, он мог долго вести беседу, раскрывая все новые и новые подробности давних историй. Голос его всегда был спокоен и ласков, никогда Николай Васильевич не стремился навязать своего мнения ни в дружеской беседе, ни в деловой. Он всегда был открытым и отзывчивым наставником для молодых ученых и волонтеров и, несмотря на возраст, легко находил с ними общий язык. Его мягкость и доброта проявлялись и в его подходе к объектам исследований – к птицам он всегда относился с особой заботой, понимая, что они требуют такого же бережного отношения, как и люди. Это искреннее участие и внимательность к другим вызывало уважение у людей, знавших его лично.

Николай Васильевич был в числе первых энтузиастов при создании Ладожской орнитологической станции и одним из основателей стационара «Маячино», внес значительный вклад в многолетние исследования, проводимые на базе этих станций. Еще будучи студентом университета, он приступил к изучению биологии птиц с использованием отлова и кольцевания, исходил все леса и болота в окрестностях полевых стационаров, много зим провел за обработкой уникальных материалов. Даже в сложные времена он поддерживал работу на обеих станциях, осознавая их огромную научную ценность. А в последние годы, несмотря на слабое здоровье, продолжал регулярно приезжать на Ладожскую орнитологическую станцию, чтобы оказать посильную помощь в исследованиях и передать свои знания следующему поколению орнитологов. Его внимание к судьбе станции и стремление сохранить ее наследие вдохновляли его учеников на продолжение его дела.

Мы всегда будем помнить Николая Васильевича как светлого жизнерадостного человека. Будем помнить его истории, веселые и серьезные, курьезные и драматичные, непринужденно рассказывающие о нелегких годах появления Ладожской орнитологической

станции, о многочисленных сезонах, проведенных в «Маячино», о временах работы энтузиастов и искателей приключений, людей, искренне любящих природу и готовых бороздить самые неизведанные области науки. Таким человеком всегда оставался и Николай Васильевич.

Важно отметить, что Николай Васильевич был не только выдающимся, активным ученым и наставником для своих учеников, он был еще и добрым семьянином – любящим братом, мужем, отцом. Свою будущую жену он встретил уже в зрелом возрасте, но всегда говорил, что долго ждал встречи со своей Единственной, и когда дождался, уже не разлучался с ней никогда. У Николая Васильевича и его супруги, Людмилы Васильевны, появилось трое детей, и еще одного ребенка они взяли в семью. Вечная благодарность таким добрым и неравнодушным людям!

Мы глубоко скорбим о его утрате и выражаем искренние соболезнования его родным, близким и коллегам. Светлая память Николаю Васильевичу!

*А. Ю. Кретьова, М. В. Матанцева,
А. В. Артемьев, С. А. Симонов,
Т. А. Рымкевич*

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 клейках (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. 8, 2024

“ECOLOGICAL STUDIES” Series

TABLE OF CONTENTS

ORIGINAL ARTICLES

L. E. Nazarova. CHANGES IN THE LONG-TERM SOIL TEMPERATURE REGIME IN KARELIA	5
L. V. Vetchinnikova, A. F. Titov, T. D. Tatarinova. FEATURES OF THE FATTY ACID COMPOSITION OF GLYCOLIPIDS IN BUDS OF SILVER BIRCH GROWING UNDER DIFFERENT NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS	14
S. A. Iglovsky, A. V. Bazhenov, E. Yu. Yakovlev. PATTERNS IN THE SPATIAL DISTRIBUTION OF NATURAL AND MAN-MADE RADIONUCLIDES IN URBAN SOILS AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKES OF MONCHEGORSK	27
V. N. Dobronravina, E. A. Volkova, V. N. Khramtsov. DYNAMICS OF RECREATIONAL PINE STANDS IN OZERO SHCHUCHYE NATURE RESERVE (ST. PETERSBURG)	42
I. N. Bakhmet, D. A. Ekimov. CARDIAC ACTIVITY OF <i>MYTILUS EDULIS</i> L. OF DIFFERENT AGES UNDER TEMPERATURE CHANGES	51
A. P. Stolyarov. FEATURES OF THE SPATIAL AND SPECIES STRUCTURE OF MACRO- AND PSEUDO-MEIOBENTHOS IN LAGOON ECOSYSTEMS OF KISLAYA BAY HEAD (GULF OF KANDALAKSHA, WHITE SEA)	60
G. E. Zdorovennova, N. I. Palshin, R. E. Zdorovenov, S. R. Bogdanov, T. V. Efremova, S. I. Smirnov, Iu. S. Novikova. OXYGEN REGIME OF LAKE VENDYURSKOE IN WINTER IN RESPONSE TO TROUT FARM OPERATIONS	73

SHORT COMMUNICATIONS

D. V. Bazegsky, A. V. Vasilieva. EXPERIENCE IN IMPLEMENTING ENVIRONMENTAL PROJECTS OF THE KARELIA CBC PROGRAMME AND PROSPECTS FOR ITS USE IN REGIONS OF THE RUSSIAN ARCTIC	84
--	----

CHRONICLE

N. M. Kaznina, A. F. Titov. All-Russian Conference with international participation and Young Scientists School “Basic and Applied Aspects of Adaptation of Living Organisms to Changing Environments in the North: Research, Innovations, Visions” (Petrozavodsk, September 9-13, 2024)	94
D. V. Bazegsky. Takeaways from the roundtable “BRICS+ as a platform for scientific cooperation in the Arctic: challenges and prospects of joint research”	98

DATES AND ANNIVERSARIES

T. G. Shibaeva. Alexander F. Titov (on the 75th anniversary) 100

E. M. Matveeva, N. M. Kaznina. Evgenii P. Ieshko (on the 75th anniversary) 104

O. P. Sterligova, I. A. Baryshev, N. V. Il'mast. Sergei F. Komulainen (on the 75th anniversary) 108

BEREAVEMENTS

A. Yu. Kretova, M. V. Matantseva, A. V. Artem'ev, S. A. Simonov, T. A. Rymkevich. In memory of
Nikolai V. Lapshin (1946–2024) 112

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 115

Научный журнал

**Труды Карельского научного центра
Российской академии наук**
№ 8, 2024

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»*

Выходит 8 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 20.12.2024. Дата выхода 30.12.2024. Формат 60x84^{1/8}.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 13,1. Усл. печ. л. 14,3.
Тираж 100 экз. Заказ 834. 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